

## 明 細 書

## 光デバイス、及びフォトニック結晶スラブの製造方法

## 技術分野

- [0001] 本発明は、たとえば、フィルタ、プリズム、導波路、および光平面回路などに使用されるフォトニック結晶スラブを利用した光デバイス、およびフォトニック結晶スラブの製造方法に関する。

## 背景技術

- [0002] 従来のフォトニック結晶スラブは、屈折率が一定のスラブ(屈折率 $=\nu_2$ )中に複数の柱状部分(屈折率 $=\nu_1$ )を二次元周期的に配列した二次元フォトニック結晶と、二次元フォトニック結晶を膜厚方向に挟み込む、 $\nu_1$ 、 $\nu_2$ よりも低い屈折率を有する下部クラッドおよび上部クラッド(屈折率 $=\nu_3$ )と、基板とで構成されている。
- [0003] (1)フォトニック結晶スラブ中を伝搬する光は、二次元フォトニック結晶の如何なる部分の屈折率よりも低い上下クラッドとの境界で全反射により上下方向に閉じ込められる(例えば、特開2001-337236(例えば、第1図)参照)。
- [0004] (2)また、二次元および三次元フォトニック結晶において、周期長や周期性の方向を、結晶中の位置に関して徐々にまたは階段状に変化させるものもある(例えば、特開2001-91701(例えば、第9図)参照)。尚、図9は、高屈折率材料10( $\text{SiO}_2$ )と、低屈折率材料11( $\text{SiO}_2$ )とをZ方向に交互に重ねて配置した構成であり、図9の構造の導波作用の原理を図10により示している。
- [0005] 尚、特開2001-337236、特開2001-91701の文献の全ての開示は、そっくりそのまま引用することにより、ここに一体化する。
- [0006] (1)しかしながら、前者においては、二次元周期的に配置する柱状部分(屈折率 $=\nu_1$ )と柱状部分以外(屈折率 $=\nu_2$ )とクラッド部分(屈折率 $=\nu_3$ )の間で $\nu_1 \neq \nu_2$ 、 $\nu_1 > \nu_3$ 、 $\nu_2 > \nu_3$ の関係を満足する材料を選択する必要がある。そして、膜厚方向の光の漏れの低減には、 $\nu_1$ と $\nu_3$ との屈折率差および $\nu_2$ と $\nu_3$ との屈折率差は大きい方がよい。また、フォトニック結晶を構成するには $\nu_1$ と $\nu_2$ との屈折率差もできるだけ大きくする必要がある。

- [0007] このため、材料の組合せは限られる。
- [0008] 例えば、クラッドに屈折率が最も低い空気(屈折率=1)を選択した場合、フォトニック結晶部分は、高屈折率材料(例えば、屈折率=3以上の半導体材料)と低屈折率材料(例えば、樹脂・ガラス・空気など)とを組合せることになる。これで、フォトニック結晶としての最低限の屈折率差を確保できる(低屈折率材料を空気にすればフォトニックバンドギャップは得られるが、厳密には  $v_1 > v_3$  を満足しない)。
- [0009] ところが、クラッドを空気にするエアーブリッジ構造は、フォトニック結晶を空中に浮かせる必要があり、取扱が困難であることがある。
- [0010] また、クラッドを固体の最低屈折率材料であるフッ素化合物(屈折率=約1.3)とした場合、フォトニック結晶部分の低屈折率材料として高屈折率材料の屈折率に近い半導体材料を用いると、フォトニック結晶としての機能が限定され、一方、フォトニック結晶部分の低屈折率材料として樹脂やガラスなどの屈折率が2以下の材料を用いると、クラッドとの屈折率差が小さくなり膜厚方向の光の閉じ込めが弱くなる(特に膜厚が5  $\mu$  m以下の二次元フォトニック結晶の場合、回折が大きいのでほとんど漏れる)。
- [0011] (2)また、後者においては、長周期フォトニック結晶部分のコアと、コアを取り囲む短周期フォトニック結晶のクラッドとを利用し、周期制御によって周囲方向に位相速度を早くすることで光を相対的に位相速度の遅いコアに閉じ込める。
- [0012] この方法は、周期を制御することでy方向の光の伝搬モードフィールドの状態を自由に制御できるので、デバイス設計の上で非常にメリットが大きい。また、コアやクラッドが固体で構成されるので、ハンドリングが良く実用的である。
- [0013] しかし、周期を変調する方法は、製造プロセスにおいて高度な管理が必要である上、製造装置が特殊になってしまう。
- [0014] 本発明は、上記従来のこのような課題を考慮し、たとえば、より簡単な光学系でフォトニック結晶の周期を有さない方向に対して光を閉じ込めることができる光デバイス、および光デバイスの製造方法を提供することを目的とする。

#### 発明の開示

- [0015] 第1の本発明は、入射される光の光軸の方向に垂直な第一の方向に関して、前記光軸から遠ざかるに従って減少する屈折率の分布を有する第一の部材と、

前記第一の部材の中に、前記第一の方向とは異なる第二の方向に関して、実質的に周期的に配置された第二の部材と、

を有するフォトニック結晶を備えた光デバイスである。

[0016] 第2の本発明は、前記光軸から前記遠ざかるに従って減少する屈折率の分布とは、前記第二の部材の前記周期的な配置の方向以外の方向に向かって減少する屈折率の分布である上記第1の本発明の光デバイスである。

[0017] 第3の本発明は、(a)前記第一の部材が有する前記第一の方向に関する屈折率の分布と、

(b)前記フォトニック結晶が有する前記第一の方向に関する厚さと、

(c)前記入射される光の波長と、

(d)前記入射される光の、前記光が入射される前記フォトニック結晶の光入射端部の内側における、前記第一の方向に関するビームスポット半径とは、

前記入射される光が前記第一の方向に関して前記フォトニック結晶の内部に実質上閉じ込められるように決定されている上記第2の本発明の光デバイスである。

[0018] 第4の本発明は、前記フォトニック結晶は、膜形状を有し、

前記第一の方向は、前記膜形状の膜厚の方向であり、

前記第二の方向は、前記膜形状の膜面に平行な方向である上記第3の本発明の光デバイスである。

[0019] 第5の本発明は、前記第一の部材が有する前記膜厚の方向に関する屈折率の分布は、前記フォトニック結晶が有する前記膜厚の方向に関する厚さ $W$ と、前記入射される光の波長 $\lambda$ と、前記入射される光の、前記光入射端部の内側における、前記膜厚の方向に関するビームスポット半径 $\omega_1$ とに基づいて決定される所定の分布関数よりも大きな急峻性を有する上記第4の本発明の光デバイスである。

[0020] 第6の本発明は、前記所定の分布関数は、前記光軸を基準とする前記膜厚の方向に関する座標 $y$ についての、屈折率分布定数 $g$ 、および前記屈折率の最大値 $n_1$ を有する二次関数

[0021] [数1]

$$n(y) = n_1 \left( 1 - \frac{g^2 y^2}{2} \right)$$

[0022] で実質的に与えられる上記第5の本発明の光デバイスである。

[0023] 第7の本発明は、前記所定の分布関数は、前記光軸を基準とする前記膜厚の方向に関する座標 $y$ についての、屈折率分布定数 $g$ 、平坦部分定数 $a$ 、および前記屈折率の最大値 $n_1$ を有する関数

[0024] [数2]

$$n'(y) = \begin{cases} n_1 \left\{ 1 - \frac{g^2 (y+a)^2}{2} \right\} & (y \leq -a) \\ n_1 & (-a \leq y \leq a) \\ n_1 \left\{ 1 - \frac{g^2 (y-a)^2}{2} \right\} & (a \leq y) \end{cases}$$

[0025] で実質的に与えられる上記第5の本発明の光デバイスである。

[0026] 第8の本発明は、前記屈折率分布定数 $g$ は、

[0027] [数3]

$$g \geq \frac{2\lambda}{\pi \omega_1 W}$$

[0028] を実質的に満足する上記第6または第7の本発明の光デバイスである。

[0029] 第9の本発明は、前記入射される光の波面の前記光入射端部における曲率半径は、実質的に無限大である上記第5の本発明の光デバイスである。

[0030] 第10の本発明は、前記ビームスポット半径 $\omega_1$ は、前記厚さ $W$ の実質的に半分である上記第9の本発明の光デバイスである。

[0031] 第11の本発明は、前記膜厚は、所定の箇所において変化している上記第9の本発明の光デバイスである。

[0032] 第12の本発明は、前記第一の部材が有する前記膜厚の方向に関する屈折率の分

布と、前記フォトニック結晶が有する前記膜厚の方向に関する厚さ $W$ と、前記入射される光の波長 $\lambda$ と、前記入射される光の、前記光入射端部の内側における、前記膜厚の方向に関するビームスポット半径 $\omega_1$ とは、前記入射される光が前記所定の箇所においては前記膜厚の方向に関して前記フォトニック結晶の外部に漏れるように決定されている上記第11の本発明の光デバイスである。

[0033] 第13の本発明は、前記第二の部材の実質的に周期的な配置は、所定の箇所において変化している上記第9の本発明の光デバイスである。

[0034] 第14の本発明は、前記所定の箇所は、前記入射される光の、前記フォトニック結晶の内側における、前記膜厚の方向に関するビームスポット半径が極大値または極小値をとる箇所である上記第13の本発明の光デバイスである。

[0035] 第15の本発明は、前記所定の箇所は、前記光入射端部から前記光が出射される前記フォトニック結晶の光出射端部まで連続した、前記第二の部材が実質的に配置されていない箇所である上記第13の本発明の光デバイスである。

[0036] 第16の本発明は、前記第二の部材は、前記膜厚の方向に延びた空孔を利用して配置された空気である上記第9の本発明の光デバイスである。

[0037] 第17の本発明は、前記フォトニック結晶を保持する基板をさらに備え、前記空孔は、前記基板の側に延びている上記第16の本発明の光デバイスである。

[0038] 第18の本発明は、前記入射される光を、前記光入射端部に誘導するための誘導部をさらに備えた上記第3の本発明の光デバイスである。

[0039] 第19の本発明は、前記誘導部は、前記入射される光を、その波面の前記光入射端部における曲率半径が実質的に無限大となるように変換する上記第18の本発明の光デバイスである。

[0040] 第20の本発明は、前記誘導部は、前記入射される光を、ビームウェストが前記光入射端部において形成されるように変換する上記第18の本発明の光デバイスである。

[0041] 第21の本発明は、前記誘導部は、前記入射される光を、その前記光入射端部の内側における前記第一の方向に関するビームスポット半径が実質的に前記フォトニック結晶が有する前記第一の方向に関する厚さの半分となるように変換する上記第18の本発明の光デバイスである。

- [0042] 第22の本発明は、前記第一の部材は、ポリシランを主成分とする基材にシロキサン構造が前記屈折率の分布に対応して分布している部材である上記第3の本発明の光デバイスである。
- [0043] 第23の本発明は、入射される光の光軸の方向に垂直な第一の方向に関して、屈折率の分布を有する第一の部材と、前記第一の部材の中に、前記第一の方向とは異なる第二の方向に関して、実質的に周期的に配置された第二の部材とを有するフォトニック結晶スラブの製造方法であって、  
ポリシランを主成分とし所定の厚みを有する基材を供給する第1工程と、  
前記供給された基材に対し、前記ポリシランの酸化反応を起こさせるとともに、前記厚み方向を基準として前記酸化反応の進行の程度を制御することにより、前記光軸から遠ざかるに従って減少する屈折率の分布を形成する第2工程と、  
前記第2工程の前の工程又は、後の工程において、前記第二の部材を形成する第3工程と、  
を備えたフォトニック結晶スラブの製造方法である。
- [0044] 第24の本発明は、前記光軸から前記遠ざかるに従って減少する屈折率の分布とは、前記第二の部材の前記周期的な配置の方向以外の方向に向かって減少する屈折率の分布である上記第23の本発明のフォトニック結晶スラブの製造方法である。
- [0045] 第25の本発明は、前記第一の方向は、前記基材の厚みの方向であり、  
前記第二の方向は、前記基材の表面に平行な方向である上記第24の本発明のフォトニック結晶スラブの製造方法である。
- [0046] 第26の本発明は、前記第2工程では、前記基材に対し、その両面側から紫外線を照射することにより前記屈折率の分布を生じさせ、  
前記屈折率の分布の仕方が予め定めた基準を満たす様に、前記紫外線の照射量を制御する上記第25の本発明のフォトニック結晶スラブの製造方法である。
- [0047] 第27の本発明は、前記第1工程では、前記基材を所定の基板上に塗布し、  
前記第2工程では、前記塗布された基材に対し、前記紫外線の照射と共に熱処理を行うことにより、前記基材を硬化させ、  
前記第3工程では、前記硬化した前記基材に対して、金型を用いるか、又はエッ

チングを行うことにより前記第二の部材としての円筒状の空孔を周期的に配置させる  
上記第26にの本発明のフォトニック結晶スラブの製造方法である。第28の本発明  
は、前記予め定めた基準とは、前記屈折率の分布が、前記フォトニック結晶スラブが  
有する膜厚の方向に関する厚さ $W$ と、前記入射される光の波長 $\lambda$ と、前記入射される  
光の、光入射端部の内側における、前記膜厚の方向に関するビームスポット半径 $\omega_1$   
とに基づいて決定される所定の分布関数よりも大きな急峻性を有することである上記  
第27にの本発明のフォトニック結晶スラブの製造方法である。

- [0048] 以上述べたことから明らかなように、本発明は、たとえば、より簡単な光学系でフォト  
ニック結晶の周期を有さない方向に対して光を閉じ込めることができるという効果を有  
するものである。

#### 図面の簡単な説明

- [0049] [図1]図1は、本発明の実施の形態1のGI型フォトニック結晶スラブの断面概要図で  
ある。

[図2]図2は、本発明の実施の形態1のGI型フォトニック結晶スラブの概要図である。

[図3]図3は、本発明の実施の形態1のGI型フォトニック結晶スラブの解析用モデル  
の概要図である。

[図4]図4は、本発明の実施の形態1の空孔が無い場合のGI型フォトニック結晶スラ  
ブの光閉じ込め条件の説明図である。

[図5]図5は、本発明の実施の形態1の空孔が無い場合のGI型フォトニック結晶スラ  
ブ内の最大スポット径 $\omega_2$ と屈折率分布定数 $g$ の関係の説明図である。

[図6]図6は、本発明の実施の形態1の空孔半径 $r$ と周期 $\delta$ の関係が約 $r=0.2 \times \delta$   
の場合のGI型フォトニック結晶スラブ内の最大スポット径 $\omega_2$ と屈折率分布定数 $g$ の関  
係の説明図である。

[図7]図7(a)ー図7(c)は本発明の実施の形態1のGI型フォトニック結晶スラブの三  
次元FDTDシミュレーション結果の説明図である。

[図8]図8は、本発明の実施の形態1のGI型フォトニック結晶スラブ(変形例)の概要  
図である。

[図9]図9は、本発明の実施の形態3の膜厚が変化するGI型フォトニック結晶スラブの

断面概要図である。

[図10]図10は、本発明の実施の形態4の意図的に伝搬ロスを制御するGI型フォトニック結晶スラブの断面概要図である。

[図11]図11は、本発明の実施の形態5のビームウェスト近傍で周期構造変化させたGI型フォトニック結晶スラブの断面概要図である。

[図12]図12は、本発明の実施の形態の基板内部まで空孔が延長されたGI型フォトニック結晶スラブの断面概要図である。

[図13]図13は、本発明の実施の形態の入射端から出射端まで周期欠陥列を有するGI型フォトニック結晶スラブの概要図である。

[図14]図14は、本発明の実施の形態の入射端にビームウェストを形成するレンズを入射部に設けたGI型フォトニック結晶スラブの断面概要図である。

[図15]図15は、本発明の実施の形態の膜厚と異なるコア径を有する光ファイバーとの間に膜厚方向にテーパと屈折率分布を有するビーム誘導部を設けたGI型フォトニック結晶スラブ断面概要図である。

[図16]図16(a)－図16(d)は、本発明の実施の形態2のGI型フォトニック結晶の製造方法の特徴部分の説明図である。

[図17]図17(a)－図17(c)は、本発明の実施の形態2のGI型フォトニック結晶の孔形成方法の説明図である。

[図18]図18(a)－図18(c)は、本発明の実施の形態2のGI型フォトニック結晶の別の孔形成方法の説明図である。

[図19]図19は、本発明の実施の形態の円柱形状を有するGI型フォトニック結晶の概要図である。

## 符号の説明

- [0050] 1 GI型スラブ  
2 空孔  
3、3' 基板  
4 GI型フォトニック結晶スラブ  
5 入射側導波路



- 9 入射端
- 10 出射端
- 12 屈折率分布
- 13 断面
- 17 三角格子の基本格子ベクトル
- 18 一定部分
- 19 屈折率分布部分
- 20 光軸(屈折率極大位置)
- 30 GRINレンズ
- 31 空気層
- 90 膜厚減少部分
- 91 最低屈折率分布定数増加部分
- 92 膜厚減少部分屈折率極大位置
- 100 光閉じ込め部分
- 101 光漏れ部分
- 102 漏れ光
- 103 (漏れ部分)折率分布
- 110 ビームウェスト
- 111 機能部分
- 120 基板内空孔
- 130 周期欠陥部分 140 光源ビーム
- 141 レンズ
- 142 波面
- 150 光ファイバー
- 151 コア
- 152 クラッド
- 153 光ファイバーの光軸
- 154 誘導部

155 ビームスポット軌跡

156 テーパー

1601 シート状ポリシラン

1602 ポリシラン構造(高屈折率)

1603 シロキサン構造(低屈折率)

1604 屈折率分布形成済みのスラブ

発明を実施するための最良の形態

[0051] 以下、本発明の実施の形態を、図面を参照しながら説明する。

[0052] (実施の形態1)

はじめに、図1、2を主として参照しながら、本実施の形態の光デバイスの原理について説明する。

[0053] ここに、図1は、膜厚方向において中心付近で極大となり、その中心から距離が離れるに従ってほぼ放物線状に屈折率が低下する屈折率分布を有するフォトニック結晶スラブ(本明細書では、これをGraded-Index型フォトニック結晶スラブと名付けて、以下、単にGI型フォトニック結晶スラブと呼ぶ)の断面図であり、膜厚方向と伝搬方向とを含む断面13(図2参照)の概要図である。また、図2は、断面13の位置を示すGI型フォトニック結晶スラブの斜視図である。

[0054] なお、ビームスポット軌跡41(図1等参照)は、入射側導波路5(コア屈折率: $n_0$ )とGI型フォトニック結晶スラブ4との境界部分や、GI型フォトニック結晶スラブ4と空孔2との境界部分で不連続に変化する。しかし、その不連続性の程度は小さいので、図1等を示す様に、ビームスポット軌跡41を連続的に図示した(以下同様)。

[0055] また、入射端9のGI型フォトニック結晶スラブ内側での入射端スポット半径 $\omega_1$ は、GI型フォトニック結晶スラブ内ビームスポット半径 $\omega_2$ の最大値 $\omega_{2max}$ 以下である。しかし、入射端でのビームの波面の曲率半径が無限大である場合(以下において主として考察される場合)にはこれらが一致するので、この場合を図示した(以下同様)。

[0056] 本実施の形態では、半導体プロセスや成型プロセスで加工しやすいスラブ中に所定の柱状部分(柱状部材)を二次元周期的に形成するGI型フォトニック結晶スラブ4において、膜厚に垂直な方向はフォトニック結晶の特性で光を制御する方法を利用

し、膜厚方向の光の閉じ込めについては、クラッドの屈折率に依存しない方法を利用する。

- [0057] より具体的に述べると、図1に示す様に、本実施の形態の光デバイスは、膜厚方向において屈折率の極大(最大)部分から離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を有するGI型スラブ1中の膜厚方向に垂直な二次元方向に、所定の屈折率を周期的に配置したGI型フォトニック結晶スラブ4と、GI型フォトニック結晶スラブ4へ光を入射させる入力部としての入射側導波路5とを備えている。
- [0058] そして、GI型フォトニック結晶スラブ4は、その入射端9のGI型フォトニック結晶スラブ内側での入射端スポット半径 $\omega_1$ と、波長 $\lambda$ と、GI型スラブ1の膜厚方向の屈折率分布形状とで一義的に決まるGI型フォトニック結晶スラブ内ビームスポット半径 $\omega_2$ の2倍以上の膜厚 $W$ を有する。
- [0059] このように、フォトニック結晶の周期方向以外の方向に屈折率の極大部分から離れるに従って屈折率が増加しない特定の条件を満足する屈折率分布を設けることで、回折効果で光が漏れる方向において光を閉じ込めることができる。
- [0060] また、屈折率分布の形状を操作することで、フォトニック結晶の周期を有しない方向のビームスポット半径 $\omega_2$ の大きさを任意に変化させることができる。
- [0061] 屈折率分布の形状の操作をとまう、このようなフォトニック結晶の製造方法については、実施の形態2において説明を行う。
- [0062] なお、GI型フォトニック結晶スラブ4は本発明のフォトニック結晶に対応し、本実施の形態の光デバイスは本発明の光デバイスに対応する。
- [0063] つぎに、本実施の形態の光デバイスの構成および動作について、より詳細に説明する。
- [0064] 本実施の形態の光デバイスは、基板3と、GI型フォトニック結晶スラブ4の入射端9に結合されたコア屈折率 $n_0$ の入射側導波路5とを備えている。
- [0065] また、本実施の形態の光デバイスは、膜厚方向に対応する $y$ 方向のほぼ中心で極大値 $n_1$ を有し、 $y=0$ に対応する光軸(屈折率極大位置)20からの距離 $y$ に関してほぼ
- [0066] [数1]

$$n(y) = n_1 \left( 1 - \frac{g^2 y^2}{2} \right)$$

[0067] の屈折率分布12に沿って低下する屈折率分布を有するGI型スラブ1のy方向に垂直な光伝搬方向に対応するz方向と幅方向に対応するx方向とに関して二次元周期的に配列され、y方向に伸びる複数の空孔2を形成したGI型フォトニック結晶スラブ4を備えている。

[0068] ここに、屈折率分布定数gに関して、

[0069] [数3]

$$g \geq \frac{2\lambda}{\pi\omega_1 W}$$

[0070] が成立する。ただし、WはGI型スラブ1の膜厚、 $\omega_1$ は入射端9のGI型フォトニック結晶スラブ内側でのビームスポット半径、 $\lambda$ は波長である。

[0071] なお、基板3は、GI型フォトニック結晶スラブ4の強度を補強するためのもので、光の閉じ込めには何ら寄与していないので、除去しても問題無い。

[0072] このように、特定の屈折率変化以上の変化をつけることにより、光軸20から離れるほど位相速度をより早くできるので、光の漏れの原因となる回折を抑制することができる。

[0073] 尚、上述したy方向における屈折率の分布が、上記(数1)、(数3)の条件を満たすことにより、何故、膜厚方向の光閉じ込めが可能となるのかについては、更に後述するが、本実施の形態において導き出したこれらの数式の利用例を簡単に述べる。

[0074] 即ち、例えば、伝搬対象となる光の波長 $\lambda$ 、上記ビームスポット半径 $\omega_1$ 、GI型スラブ1の膜厚Wが、要求仕様として予め決められている状況下において、膜厚方向の光閉じ込めを可能とするGI型フォトニック結晶スラブ4を設計し、製造する場合に上記数式を利用する。具体的には、上記要求仕様の値を数3に代入して、屈折率分布定数gを求めて、それらを基に(数1)の分布関数を決定する。そして、後述する様に、例えば、ポリシランを主成分とする基材(スラブ1604、図16(d)参照)においてシロキ

サン構造が上記分布関数に対応して分布するGI型フォトニック結晶スラブ4を製造することが出来る。

- [0075] また、上記の例とは逆に、製造可能な屈折率の分布が予め決まっており、且つ、上記3つのファクターである、伝搬対象となる光の波長 $\lambda$ 、上記ビームスポット半径 $\omega_1$ 、GI型スラブ1の膜厚 $W$ の内、何れか2つが決まっている場合に、残りの一つのファクターを、上記数式を利用することにより適切に導き出すことが可能となる。
- [0076] 次に、GI型フォトニック結晶スラブ4の膜厚方向の光閉じ込めメカニズムについて、より詳細に説明する。
- [0077] GI型フォトニック結晶スラブ4の膜内の光の制御は二次元結晶格子で制御されるので、膜厚方向に対応する $y$ 方向と光伝搬方向に対応する $z$ 方向とを含む断面13(図2参照)において $y$ 方向の光の閉じ込めを議論すればよい。ただし、空孔2が大きいほど回折による光損失が大きいので、最も空孔2の占有率が大きくなる(すなわち、空孔2の断面が、空孔2の直径を含む)、二次元結晶格子を構成する二次元三角格子の基本格子ベクトル17の一つが示す方向を、光伝搬方向に対応する $z$ 方向とした。この最も空孔2の占有率が大きい場合の光閉じ込め条件は、より空孔の占有率が小さな全ての場合についても有効である。
- [0078] 図1の断面内のビーム解析は、図3に示すGRIN(Graded-Index)レンズ30と空気層31とを周期的に縦列した1次元のレンズ導波路モデルに置き換えることができる。
- [0079] ここに、図3は、GRINレンズを縦列したGI型フォトニック結晶スラブの解析用モデルである。
- [0080] そこで、光線行列を使用したビーム解析により、マックスウェルの方程式をスカラー解析する。
- [0081] 長さ $d$ を有するGRINレンズ30、および長さ $2r$ を有する空気層31の1個あたりの光線行列は、それぞれ
- [0082] [数4]

$$[Lens(d)] = \begin{bmatrix} \cos gd & \frac{1}{g} \sin gd \\ -g \sin gd & \cos gd \end{bmatrix}$$

[0083] [数5]

$$[Air(r)] = \begin{bmatrix} 1 & 2r \frac{n_1}{n_0} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

[0084] で表現される。ただし、 $r$ は空孔半径、 $n_0$ は前述の通りGI型フォトニック結晶スラブ入射前の材料に該当する光導波路5の屈折率である。

[0085] 従って、GRINレンズ30を $n$ 個縦列したGI型フォトニック結晶スラブ内の $k$ 番目のGRINレンズ36 ( $k=1, 2, \dots, n$ )の入射端から距離 $z'$ の位置(GI型フォトニック結晶入射端からの距離は $Z=(k-1) \times d + z'$ である)における光線行列は

[0086] [数6]

$$[GIPC(Z)] = [Lens(z')]([Air(r)][Lens(d)])^{k-1} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$$

[0087] となる。ただし、 $A, B, C, D$ は行列要素とする。

[0088] このような光線行列に対する、 $k$ 番目のGRINレンズ36内のビームスポット半径 $\omega_2$ と入射端9でのスポット半径 $\omega_1$ との関係は、

[0089] [数7]

$$\left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 = \left( A + \frac{B}{R_1} \right)^2 + \left( \frac{\lambda}{\pi \omega_1^2} \right)^2 B^2$$

[0090] で表される。ただし、 $R_1$ は入射端でのビームの波面の曲率半径である。

[0091]  $A$ および $B$ はGRINレンズのレンズ効果と空孔の空間伝搬で構成されるビームの拘束に関し、 $\lambda / \omega_1$ は回折効果によるビームの拡散に関する。したがって、(数7)における右辺の第1項は光の波動性が考慮されない幾何光学的に決まる $\omega_1$ と $R_1$ から計

算される $\omega_2$ の成分とに寄与し、同第2項は光の波動性が考慮された波動光学的に決まる回折をBで表されるレンズ効果で抑制した $\omega_2$ の成分に寄与する。

- [0092] したがって、 $\omega_2$ を小さくするためには、幾何光学的には $\omega_1$ を小さくしてR1を大きくする方がよく、波動光学的には $\omega_1$ を大きくして $\lambda$ を小さくした方がよいことになる。ただし、通常は、フォトニック結晶スラブの膜厚は一般的にシングルモード光ファイバー(SMF)のモードフィールド径(MFD)の約 $9\mu\text{m}$ よりも小さいので、 $\omega_1$ よりも $1/\omega_1$ の方がはるかにスポット半径 $\omega_2$ への影響が大きい。
- [0093] なお、ビームスポット半径 $\omega_2$ はガウシアンビームの強度が中心での極大値の $1/e^2$ ( $e$ は自然対数の底である)となる半径で定義されるので、ビームの全てがGI型フォトニック結晶スラブの膜厚を超えないと言うわけではない。しかし、ビームスポット半径 $\omega_2$ が膜厚内で変化する限りにおいては、ビームが膜厚から超えることは無い。
- [0094] 次に、光閉じ込め条件を、屈折率分布定数 $g$ 、膜厚 $W$ 、空孔半径 $r$ などのGI型フォトニック結晶スラブの構成要素で表したい。
- [0095] しかしながら、光閉じ込め条件をこれらの構成要素の関係式で表現するのは非常に困難であり、具体的な光閉じ込め条件は計算機を使用した数値解析に頼るのが実用的である。
- [0096] 以下では、空孔半径 $r$ と光閉じ込めを使用してGI型フォトニック結晶スラブ内の光閉じ込めの必要条件を導出する。
- [0097] 空気層31の光線行列を見れば分かるように、空孔にはレンズ効果は無く回折を促進する効果しかないので、GI型スラブによるレンズ効果は空孔が無い場合の回折効果以上が必要である。
- [0098] 従って、 $r=0$ を代入して得られる条件は、光閉じ込めの必要条件である。
- [0099]  $r=0$ である時のGI型フォトニック結晶スラブの入射端から $Z$ 位置での光線行列は、
- [0100] [数8]

$$[GIPC(Z)] = \begin{bmatrix} \cos gZ & \frac{1}{g} \sin gZ \\ -g \sin gZ & \cos gZ \end{bmatrix}$$

[0101] で表される。

[0102] そして、(数7)は

[0103] [数9]

$$\begin{aligned} \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 &= \left(\cos gZ + \frac{1}{R_1} \frac{1}{g} \sin gZ\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{\pi\omega_1^2}\right)^2 \left(\frac{1}{g}\right)^2 \sin^2 gZ \\ &= \frac{1}{R_1} \frac{1}{g} \sin 2gZ - \frac{1}{2} \left[ \left\{ \frac{1}{R_1^2} + \left(\frac{\lambda}{\pi\omega_1^2}\right)^2 \right\} \left(\frac{1}{g}\right)^2 - 1 \right] \cos 2gZ + \frac{1}{2} \left[ \left\{ \frac{1}{R_1^2} + \left(\frac{\lambda}{\pi\omega_1^2}\right)^2 \right\} \left(\frac{1}{g}\right)^2 + 1 \right] \\ &= \rho \sin\{2gZ - \theta\} + \frac{1}{2} \left[ \left\{ \frac{1}{R_1^2} + \left(\frac{\lambda}{\pi\omega_1^2}\right)^2 \right\} \left(\frac{1}{g}\right)^2 + 1 \right] \end{aligned}$$

[0104] となる。ただし、

[0105] [数10]

$$\rho = \sqrt{\left(\frac{1}{R_1} \frac{1}{g}\right)^2 + \frac{1}{4} \left[ \left\{ \frac{1}{R_1^2} + \left(\frac{\lambda}{\pi\omega_1^2}\right)^2 \right\} \left(\frac{1}{g}\right)^2 - 1 \right]^2}$$

[0106] となるように  $\rho$  をとり、

[0107] [数11]

$$\cos \theta = \frac{1}{R_1} \frac{1}{g}$$

[0108] [数12]

$$\sin \theta = \frac{1}{2} \left[ \left\{ \frac{1}{R_1^2} + \left(\frac{\lambda}{\pi\omega_1^2}\right)^2 \right\} \left(\frac{1}{g}\right)^2 - 1 \right]$$

[0109] となるように  $\theta$  をとった。

[0110] したがって、 $\omega_2$  の  $Z$  に関する最大値  $\omega_{2\max}$  は、

[0111] [数13]



$$\begin{aligned} \left( \frac{\omega_{2\max}}{\omega_1} \right)^2 &= \rho + \frac{1}{2} \left[ \left\{ \frac{1}{R_1^2} + \left( \frac{\lambda}{\pi \omega_1^2} \right)^2 \right\} \left( \frac{1}{g} \right)^2 + 1 \right] \\ &= \sqrt{\left( \frac{1}{R_1} \frac{1}{g} \right)^2 + \frac{1}{4} \left[ \left\{ \frac{1}{R_1^2} + \left( \frac{\lambda}{\pi \omega_1^2} \right)^2 \right\} \left( \frac{1}{g} \right)^2 - 1 \right]^2} + \frac{1}{2} \left[ \left\{ \frac{1}{R_1^2} + \left( \frac{\lambda}{\pi \omega_1^2} \right)^2 \right\} \left( \frac{1}{g} \right)^2 + 1 \right] \end{aligned}$$

[0112] を満たす。

[0113] これより $R_1$ が大であるほど $\omega_{2\max}$ は小となって光を閉じ込めるために有利であることが分かるので、以下においては、

[0114] [数14]

$$R_1 = \infty$$

[0115] よって

[0116] [数15]

$$\left( \frac{\omega_{2\max}}{\omega_1} \right)^2 = \frac{1}{2} \left| \left( \frac{\lambda}{\pi \omega_1^2} \right)^2 \left( \frac{1}{g} \right)^2 - 1 \right| + \frac{1}{2} \left\{ \left( \frac{\lambda}{\pi \omega_1^2} \right)^2 \left( \frac{1}{g} \right)^2 + 1 \right\}$$

[0117] である場合を考察する。

[0118] (数15)より、

[0119] [数16]

$$g < \frac{\lambda}{\pi \omega_1^2}$$

[0120] である場合には

[0121] [数17]

$$\omega_{2\max} = \frac{\lambda}{\pi \omega_1 g}$$

[0122] であり、

[0123] [数18]

$$g \geq \frac{\lambda}{\pi \omega_1^2}$$

[0124] である場合には

[0125] [数19]

$$\omega_{2\max} = \omega_1$$

[0126] であることがわかる。

[0127] 光が閉じ込められるための必要十分条件は、

[0128] [数20]

$$\omega_{2\max} \leq W/2$$

[0129] であるので、光が閉じ込められるための必要条件として

[0130] [数3]

$$g \geq \frac{2\lambda}{\pi \omega_1 W}$$

[0131] が得られる。

[0132] なお、(数3)を導出するにあたって

[0133] [数21]

$$\omega_1 \leq W/2$$

[0134] であることを用いたが、(数21)において等号が成立する場合における(数3)は、

[0135] [数22]

$$g \geq \frac{\lambda}{\pi} \left( \frac{2}{W} \right)^2$$

[0136] となる。

[0137] 以上より、光を閉じ込めるために有利な条件は、高屈折率・大入射スポット径・大膜厚・短波長であることが分かる。

[0138]  $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$  であるとして、(数22)で等号をとって得られる最低屈折率分布定数とGI型フォトニック結晶スラブの膜厚Wの関係を図4に示す。

[0139] ここに、図4は、空孔が無いGI型スラブの場合の光閉じ込め条件(膜厚Wと屈折率分布定数gの関係)である。なお、縦軸には対数目盛りをとっている。

[0140] 図4においては、(入射端9の内側におけるビームスポット半径  $\omega_1$ ) / (入射端9の外側におけるビームスポット半径) に等しい  $n_1/n_0$  を 1, 1.5, ..., 5 というように変化させたそれぞれの場合について、同関係を示した。

[0141] したがって、図4においては入射端9の外側におけるビームスポット半径に関して図示を行っているので、厳密には(数22)におけるWを  $(n_1/n_0)W$  で置き換えて考えなければならない。

[0142] これより、膜厚  $2 \mu\text{m}$  で入射端側の導波路の屈折率がGI型フォトニック結晶スラブの極大屈折率に等しい場合(すなわち、 $n_1/n_0 = 1$  である場合)は、少なくとも  $400/\text{mm}$  以上の屈折率分布定数gが必要であることがわかる。また、GI型フォトニック結晶スラブの極大屈折率に対応する  $n_1$  をより大きく設定したり、入射端の導波路の屈折率に対応する  $n_0$  をより小さく設定すると、より小さな屈折率分布定数gで済むこともわかる。

[0143] 次に、やはり  $\omega_1 = W/2$  である場合において、入射端側の導波路の屈折率に対応する  $n_0$  がGI型フォトニック結晶スラブの極大屈折率に対応する  $n_1$  に等しいとして、 $r = 0 \mu\text{m}$  (空孔が無い) 場合と、おおよそ  $r = 0.19 \mu\text{m}$ 、 $d = 0.74 \mu\text{m}$  である場合のGI型フォトニック結晶スラブ内での最大スポット半径  $\omega_{2\text{max}}$  と屈折率分布定数gと入射端スポット半径  $\omega_1$  の関係を、図5と図6に示す。

[0144] ここに、図5は、空孔が無いGI型スラブの場合の入射端でのスポット径  $\omega_1$  毎の最大

スポット径  $\omega_{2\max}$  と屈折率分布定数  $g$  の関係である。また、図6は、空孔半径  $r$  と周期  $\delta$  ( $=d+2r$ ) の関係が約  $r=0.2 \times \delta$  の場合の、GI型スラブの場合の入射端でのスポット径  $\omega_1$  毎の最大スポット径  $\omega_{2\max}$  と屈折率分布定数  $g$  の関係である。なお、縦軸および横軸には対数目盛りをとっている。

[0145] 図5～6においては、 $\omega_1$  を0.1, 0.5, ..., 4というように変化させたそれぞれの場合について、同関係を示した。

[0146] (数16)が成立する場合において(数15)より得られる(数23)が、図5における関係に相当する。

[0147] [数23]

$$\frac{\omega_{2\max}}{\omega_1} = \frac{\lambda}{\pi \omega_1^2} \frac{1}{g}$$

[0148] ただし、入射端スポット半径  $\omega_1$  がGI型フォトニック結晶スラブの膜厚  $W$  の半分である場合を考えているので、GI型フォトニック結晶スラブ内最大ビームスポット半径  $\omega_{2\max}$  が入射端スポット半径  $\omega_1$  よりも小さくなければならない。したがって、 $\omega_{2\max} / \omega_1$  が1以下となることが光閉じ込めの必要十分条件となり、図5の  $\omega_{2\max} / \omega_1 = 1$  となる時の屈折率分布定数  $g$  と入射端スポット半径  $\omega_1$  の関係が、図4における関係に相当することになる。

[0149] 図5と図6を比較すると、空孔の有無に関わらず、屈折率分布定数  $g$  と  $\omega_{2\max}$  との関係は類似することがわかる。ただし、空孔の存在により回折が大きくなるので、空孔がある場合には、空孔が無い場合に比べてより約1.5倍程度の大きな屈折率分布定数  $g$  が必要である。

[0150] 図7に; (a) 光の伝搬方向に関して屈折率分布がステップ状に変化する従来のSI (Step-Index) 型フォトニック結晶スラブ701の光閉じ込め条件を満足する場合における三次元FDTD (Finite Difference Time Domain) シミュレーション結果701aと、(b) 従来のエアーブリッジ構造のSI型フォトニック結晶スラブ702の光閉じ込め条件を満足する場合における三次元FDTDシミュレーション結果702aと、(c) 本実施の形態における、おおよそ  $r=0.19 \mu\text{m}$ ,  $d=0.74 \mu\text{m}$  のGI型フォトニック結晶

スラブ703の光閉じ込め条件を満足する場合の三次元FDTDシミュレーション結果703aを示す。ただし、伝搬方向と膜厚方向を含む断面のみ示す。

[0151] SI型フォトニック結晶スラブ(図7(a)参照)での光の漏れも、エアーブリッジ構造(図7(b)参照)にすると、光が完全に閉じ込められることがわかる。

[0152] GI型フォトニック結晶スラブ(図7(c)参照)の場合は、基板付きでも光は閉じ込められ、光はレンズ効果により蛇行軌跡を画くことがわかる(集光部分のみが図示されている)。

[0153] このように、膜厚方向の中心付近で極大値を有し、極大部分から離れるに従って屈折率がほぼ放物線状に低下するGI型フォトニック結晶スラブの屈折率分布定数 $g$ を膜厚などから決まる特定の値以上にすることで、回折効果で光が漏れる膜厚方向において基板の屈折率に関わらず光を閉じ込めることができる。

[0154] また、屈折率分布定数 $g$ を操作することでフォトニック結晶スラブの膜厚を自由に变化させることもできる。

[0155] なお、本実施の形態では膜厚の中心近傍で極大点を有するGI型フォトニック結晶スラブについて説明した。

[0156] しかし、これに限らず、図8に示すように、 $y=0$ に対応する中心からの距離が平坦部分定数 $a$ 以内の一定部分18、および一定部分18以外の屈折率分布部分19を利用して、屈折率が下記の(数2)に沿って低下するようにしてもよい。

[0157] [数2]

$$n'(y) = \begin{cases} n_1 \left\{ 1 - \frac{g^2 (y+a)^2}{2} \right\} & (y \leq -a) \\ n_1 & (-a \leq y \leq a) \\ n_1 \left\{ 1 - \frac{g^2 (y-a)^2}{2} \right\} & (a \leq y) \end{cases}$$

[0158] ここに、図8は、膜厚方向において中心付近でほぼ一定値の極大領域を形成し、それ以外で極大領域からの距離に従ってほぼ放物線状に屈折率が低下する屈折率分布を有するGI型フォトニック結晶スラブの膜厚方向と伝搬方向を含む断面概要図で

ある。

[0159] これでも、屈折率一定部分以外においてレンズ効果が生じるので、同様に光の閉じ込めができる。

[0160] もちろん、一定部分18では、膜厚方向15の屈折率が一定であるので、回折の効果がより強く出るが、屈折率分布部分19で屈折率分布定数 $g$ を大きくすれば、何ら問題は無い。

[0161] むしろ、この構成の目的は、一定部分18において膜厚方向15の屈折率を一定にすることにより、一定部分18における膜厚方向以外のフォトニック結晶の特性を制御し易くするためにある。

[0162] より具体的に述べると、フォトニック結晶の特性(フォトニックバンド)は、周期的に構成される材料の屈折率が一定である場合の方が計算しやすいので、現在のところはこのように一定部分18を設けた方が設計しやすい。

[0163] しかし、膜厚全体に渡って屈折率分布がある場合でも、屈折率の最大値と最小値の差が数%以下と小さければ、フォトニック結晶の特性は屈折率が一定の場合の特性からの小さな変化であると考えられ、実用上は問題が無い場合が多い。

[0164] (実施の形態2)

つぎに、本発明のフォトニック結晶スラブの製造方法の一実施の形態について、図16(a)～図18を参照しながら以下に説明する。

[0165] 図16(a)～図16(d)は、上記実施の形態1で説明したGI型フォトニック結晶スラブに関して、その製造方法の特徴部分を説明する図である。即ち、これらの図面には、基板3(図1, 図16(d)参照)の上に塗布したシート状ポリシラン1601(本発明の第1工程の基材に対応する)に対して、加熱と上下方向からの紫外線照射によって、膜厚方向に屈折率分布を形成する(本発明の第2工程に対応する)メカニズムが示されている。

[0166] まず、本実施の形態における屈折率分布の形成方法の原理について、図16(a)～図16(d)を参照しながら説明する。

[0167] シート状ポリシラン1601(図16(d)参照)は、図16(a)に示す様に、UV(紫外線)露光及び熱処理によって起こる硬化時の酸化反応により、高屈折率のポリシラン構

造1602から低屈折率のシロキサン構造1603に変化する。

従って、ポリシランにおいて、UV照射されている側(図16(d)参照)から酸化反応が起こり、シロキサン構造1603が生成される。その結果、シロキサン構造1603が多く分布するポリシラン1601の表面付近では、シロキサン構造に取り込まれた酸素の分布により酸素濃度が増加する。図16(b)は、酸化物等の拡散を行っていないシート状ポリシラン1601を用いてUV照射を行った場合の、シロキサン構造1603に取り込まれた酸素の濃度分布の変化を示した概略図である。図中の横軸が酸素濃度を表し、縦軸が膜厚の中心からの距離を表す。また、図16(c)は、上記と同様のシート状ポリシラン1601にUV照射を行った場合の、屈折率分布の変化を、図16(b)と対応させて示した概略図である。図中の横軸が屈折率を表し、縦軸が膜厚の中心からの距離を表す。

- [0168] 図16(b)～図16(d)に示す様に、UV照射用光源から離れるに従って、酸素濃度が減少しており、低屈折率のシロキサン構造1603は、酸素濃度に比例する様にUV照射用光源から離れるに従って、換言すればポリシラン1601の表面側から中心に向かうに従って減少する分布となる。図16(d)において、屈折率分布を点の濃淡で表したが、濃い所ほど屈折率がより高く、薄い所ほど屈折率がより低いことを示す。
- [0169] この様に、酸素濃度分布に対応して、ポリシラン構造1602の部分と、酸化反応により発生するシロキサン構造1603の部分とが分布することとなるので、UV照射の仕方やその他の条件設定によって、屈折率分布を自由自在に形成することが可能となる。
- [0170] その条件設定のファクターとしては、UV照射の時間、照射量、周囲温度、及び酸素濃度等が挙げられる。これらのファクターの全部又は一部を適切に設定し、あるいは制御することにより、上述した数式1～3の条件を満足する様な屈折率の分布を実現することが可能となる。
- [0171] 屈折率の分布形成において重要な点は、硬化したポリシラン1601の厚みの中心位置を基準として対称な分布を形成することである。
- [0172] 以下に、この対称分布の形成方法について更に詳細に説明する。
- [0173] シート状ポリシラン1601の膜厚が小さい場合は、雰囲気中の酸素を消費することが

できる。しかし、シート状ポリシラン1601の膜厚が大きい場合やシート状ポリシラン1601が基板等で直接空気に触れない場合には、雰囲気中の酸素濃度以外に、予め硬化前のシート状ポリシラン1601の内部に酸素あるいは酸化物を拡散させておくことで、雰囲気中の酸素が及ばない内部にまで屈折率分布を形成することができる。また、シート状ポリシラン1601の基板3側と空気側では酸素供給量(酸素濃度)が異なるので、照射するUV照射量が上下等量の場合は、酸素供給量の多い空気側の屈折率低下が大きいので、最大屈折率位置が基板3側に移動するが、基板3側から照射するUV照射量を空気側よりも多くして、非対称にすることで、空気側の酸化反応が抑制されるので、膜厚の中心位置を基準とした対称形状の屈折率分布を形成することができる。

- [0174] 例えば、図16(d)に示す屈折率分布形成済みのスラブ1604の様に、膜厚方向を基準として、屈折率が膜厚中心で極大となり、且つその膜厚中心からの距離に従って、その屈折率が中心対称のほぼ放物線形状に沿って低下するという屈折率分布(図16(b)参照)を形成する場合は、硬化前のシート状ポリシラン1601の上下から、同強度のUV照射を行えばよい。
- [0175] 但し、UV露光で硬化する場合に、基板3側から露光する場合は、基板3の材料として、紫外線に対して透明な材料、例えば、石英や、ほう珪酸ガラスなどのガラスや紫外線を透過する樹脂や $\text{LiNbO}_3$ や $\text{LiTaO}_3$ などの結晶性基板を使用する。
- [0176] 中心対称の分布であれば、近似的に放物線状に沿った分布となる。
- [0177] 尚、シート状ポリシラン1601の膜厚が大きい場合や、基板3により酸素供給量が上下で非対称になる場合は、上記スラブ1604の場合と同様に、予めシート状ポリシランに酸素あるいは酸化物を付加しておいたり、UV照射量を上下非対称にすれば、膜厚方向の屈折率分布を調整することが出来る。
- [0178] 次に、上記の工程により屈折率分布が形成された上記スラブ1604(図16(d)参照)に対し、空孔2(図1参照)を形成する第3工程について説明する。
- [0179] 空孔2の形成は、金型を利用する方法(図17参照)や、イオンビームを照射した後、エッチング処理を施す方法(図18参照)など、何れの方法を用いても良い。
- [0180] 図17(a)ー図17(c)は、上記スラブ1604に対して金型1701を押圧して(図17(a)



、(b)参照)、空孔2を形成する(図17(c)参照)工程を示す図である。金型1701の突起部1702は、図2に示す空孔2の2次元周期構造に対応した配置がなされている。

- [0181] また、図18(a)ー図18(c)は、上記スラブ1604に対してマスク1801を配置し、Ar、Xe、又はKr等のイオンビーム1802を照射して、その後、強アルカリ(NaOH)1803により、空孔(侵食孔)2を形成する工程を示す図である。
- [0182] 上記工程により、厚さ方向の中心に対して対称形状の屈折率分布を有するGI型フォトニック結晶スラブ4が得られる。
- [0183] 尚、本実施の形態の場合、シート状ポリシラン1601が第2工程で硬化されるので、この空孔の形成は、上記第2工程の後に行うのが望ましいが、それに限られるものではない。
- [0184] (実施の形態3)
- つぎに、図9を主として参照しながら、本発明の光デバイスの一実施の形態の光デバイスの構成および動作について説明する。
- [0185] ここに、図9は、光閉じ込め条件を満足するために一部の膜厚変化に応じて屈折率分布形状を変化させるGI型フォトニック結晶スラブの膜厚方向と伝搬方向を含む断面概要図である。
- [0186] 図9に示すように、GI型フォトニック結晶スラブが、伝搬方向に対応するz方向のある部分で膜厚Wが変化する膜厚減少部分90を有する。そして、膜厚減少部分90において光が閉じ込められるように変化した膜厚に対して、前述の光閉じ込め条件(数3参照)を満足するように、屈折率分布定数 $g$ をより大きな値に変化させる。
- [0187] 膜厚が途中で小さくなっているため、膜厚減少部分90のより大きな回折を抑制するために、最低屈折率分布定数の増加部分91が生じる。
- [0188] ただし、膜厚変化が膜厚方向で対称でない場合は、屈折率分布定数の変化だけでなく膜厚減少部分屈折率極大位置92も周囲とずらす必要がある。膜厚が対称に変化している場合には屈折率極大部分は周囲と同じでよい。
- [0189] 逆に、膜厚が大きくなっている場合は、最低屈折率分布定数は周囲よりも小さくて済むため、屈折率分布定数は必ずしも変化させる必要はない。

- [0190] なお、膜厚が小さくなる場合でも、膜厚減少部分90以外の屈折率分布定数が膜厚減少部分90の最低屈折率分布定数以上であれば、屈折率分布定数を変化させる必要は必ずしも無い。
- [0191] もちろん、伝搬方向に対応するz方向と膜厚方向に対応するy方向を含む断面内での膜厚変化の場合を説明したが、幅方向に対応するx方向の膜厚変化についても同様である。
- [0192] なお、膜厚最少部分の膜厚に対する光閉じ込め条件を満足する最低屈折率分布定数以上の屈折率分布定数を使用することにすれば、GI型フォトニック結晶スラブ全体において一定の屈折率分布定数を用いてもよい。
- [0193] また、GI型フォトニック結晶スラブ内において、ビームスポット半径が極小となる部分で膜厚が小さくなる場合には、光閉じ込め条件を満足する最低屈折率分布定数はより小さくてすむ。なぜなら、光閉じ込め条件を満足する最低屈折率分布定数は、ビームスポット半径の極大値が膜厚を超えないように決めているからである。
- [0194] (実施の形態4)  
つぎに、図10を主として参照しながら、本実施の形態の光デバイスの構成および動作について説明する。
- [0195] ここに、図10は、一部において、光閉じ込め条件を満足しない屈折率分布103を有する部分(光漏れ部分101)を意図的に形成した、伝搬ロスを制御する構成のGI型フォトニック結晶スラブの膜厚方向と伝搬方向を含む断面概要図である。
- [0196] GI型フォトニック結晶スラブが、伝搬方向に対応するz方向のある部分に屈折率分布定数が光閉じ込めに必要な最低屈折率分布定数以下の光漏れ部分101を有し、意図的に光をロスさせるアッテニューエータ機能あるいはドロップ機能が付加されている。
- [0197] 本実施の形態では、GI型フォトニック結晶スラブの上クラッドが空気で下クラッドが基板であるため、光漏れ部分101での光の漏れは基板側のみとなる。
- [0198] ドロップ機能を利用する場合には、漏れ光102がクラッドモードとなって基板中を伝搬し、GI型フォトニック結晶スラブ内を伝搬する本信号と分離される。
- [0199] もちろん、直接的に屈折率分布定数を光閉じ込めに必要な最低屈折率分布定数

以下にして光漏れを起こす方法について説明したが、膜厚を薄くして光閉じ込めに必要な最低屈折率分布定数を大きくし、屈折率分布定数を相対的に光閉じ込めに必要な最低屈折率分布定数以下にすることもできる。

[0200] なお、伝搬方向に対応するz方向と膜厚方向に対応するy方向とを含む断面内での屈折率分布定数変化を説明したが、幅方向に対応するx方向の屈折率分布定数変化についても同様である。

[0201] また、GI型フォトニック結晶スラブ内において、ビームスポット半径が極大になる部分で光閉じ込め条件を満足しないようにすることにより、容易に光の漏れを引き起こすことができる。

[0202] (実施の形態5)

つぎに、図11を主として参照しながら、本実施の形態の光デバイスの構成および動作について説明する。

[0203] ここに、図11は、ビームスポットが小さくなるビームウェスト領域において特定のフォトニック結晶の機能を引き出すための周期構造を形成したGI型フォトニック結晶スラブの膜厚方向と伝搬方向を含む断面概要図である。

[0204] 図11に示すように、GI型フォトニック結晶スラブ内のビームスポット半径が極小となるビームウェスト110において特定の機能を持たせるための、周囲とは異なる周期を有する機能部分111を形成するものである。

[0205] ビームウェスト110で特定の機能を有する機能フォトニック結晶部分を形成すると、ビームが通過する部分の屈折率変化が最少となるため、フォトニック結晶のフォトニックバンドを利用したデバイス設計が容易になる。

[0206] もちろん、周期を変化させる場合を説明したが、要するに、フォトニック結晶の特性を変化させればよい。

[0207] 以上においては、本実施の形態1〜5について詳細に説明を行った。

[0208] (A)なお、空孔の深さがGI型フォトニック結晶スラブの高さに一致している場合について説明を行ったが、図12に示すように、光の閉じ込めをより確実とするために、基板3'に基板内空孔120が形成されていてもよい。

[0209] ここに、図12は、基板まで空孔が延長されたGI型フォトニック結晶スラブの断面図

である。

[0210] なお、基板3'は、本発明の基板に対応する。

[0211] (B)また、無欠陥のGI型フォトニック結晶スラブに付いて説明したが、図13に示すように、GI型フォトニック結晶スラブは空孔が存在しない周期欠陥部分130を有してもよい。

[0212] ここに、図13は、入射端から出射端10まで連続して周期欠陥列を有するGI型フォトニック結晶スラブの斜視図である。

[0213] このような1次元欠陥のある場合は、欠陥部分が上述した空孔の無いGI型スラブのモデルに相当するので、光閉じ込め条件を満足する最低屈折率分布定数は周囲の無欠陥部分よりも小さくなり、空孔が存在する無欠陥部分でも欠陥部分でも光の閉じ込めが可能である。

[0214] 空孔が周期的に並ぶ周期無欠陥部分にフォトニックバンドギャップが存在する場合は、光は、周期無欠陥部分へ進入ができない。したがって、光は、膜厚方向の閉じ込めも有効なので、周期欠陥方向へのみ伝搬することになる。

[0215] なお、周期欠陥を形成するためには、周期的に配置した材料(部材)の、屈折率、周期、形状の内の少なくともひとつを変化させればよい。

[0216] (C)また、光閉じ込め条件を満足するGI型フォトニック結晶スラブと外部入力部との接続を行うための手段が、利用されてもよい。

[0217] 上述したように、GI型フォトニック結晶スラブ内での回折は、GI型フォトニック結晶スラブの入射端でのビーム状態(曲率半径 $R_1$ 、ビームスポット半径 $\omega_1$ )に大きく左右される。

[0218] たとえば、曲率半径が無限大で、ビームスポット半径が極小となるビームウェストが入射端よりも手前に有る場合、入射端ではビームは広がり気味に入射する。このような場合には、GI型フォトニック結晶スラブ内での最大スポット半径 $\omega_{2max}$ は、入射端でビームウェストがある場合に比較して大きくなる。

[0219] 一方、ビームウェストが入射端よりも内部に有る場合、入射端ではビームはしぼみ気味に入射する。このような場合には、GI型フォトニック結晶スラブ内でのビームウェストの半径が入射端でビームウェストがある場合よりも小さくなるため、回折が大きくなり、

最大スポット半径  $\omega_{2\max}$  は、入射端でビームウェストがある場合に比較して大きくなる。

[0220] 従って、ビームウェストが入射端にある場合に、GI型フォトニック結晶スラブ内での最大スポット半径  $\omega_{2\max}$  が、最も小さい。

[0221] ただし、このようなビームウェストとは、GI型フォトニック結晶スラブのレンズ効果によるものではなく、入射端近傍に生じる入射状態に依存するビームスポット半径が極小となる部分である。

[0222] なお、入射端でビームウェストができる場合でも、ビームスポット半径  $\omega_1$  が大きいほど、回折が小さく、光閉じ込めのための最低屈折率分布定数も小さくて済む。このため、入射端でのビームスポット半径  $\omega_1$  は、GI型フォトニック結晶スラブの膜厚の半分に近いほど良い。

[0223] ただし、このような入射端でのビームスポット半径  $\omega_1$  とは、GI型フォトニック結晶内部側、すなわち、GI型フォトニック結晶スラブの屈折率でのビームスポット半径のことである。なお、入射直前のビームスポット半径で議論する場合には、GI型フォトニック結晶スラブと入射側の材料の位相速度が異なるため、ビームスポット半径の変換が必要である。

[0224] さて、入射端において上述のようなビーム状態を作る方法として、図14に示すようにレンズ141などのビーム変換部を使用して、入射端にビームスポット半径が膜厚の半分にほぼ等しいビームウェストを形成する方法がある。

[0225] ここに、図14は、入射端で曲率半径が無限大となるビーム状態を形成するレンズを入射部に設けたGI型フォトニック結晶スラブの膜厚方向と伝搬方向を含む断面概要図である。

[0226] なお、レンズ141は、本発明の誘導部に対応する。

[0227] 入射側が光源ビーム140を使用した空間結合の場合は、同位相面として入射する波面142は広がり気味なので、入射端でビームウェストが形成されるように、レンズ141を使用してしぼみ気味に変換すると良い。

[0228] なお、入射側が導波路の場合は、導波路のモードフィールド径とGI型フォトニック結晶スラブのモードフィールド径とがほぼ一致する(すなわち、導波路の屈折率とGI型フォトニック結晶スラブの屈折率とがほぼ等しい)のであれば、導波路コア径と膜厚

とがほぼ一致していればよい。

- [0229] しかし、図15のように、モードフィールド径のみならず、導波路に該当する光ファイバーの光軸153もずれている場合には、膜厚方向に関するテーパー156および屈折率分布を利用するビーム変換の機能と、光を誘導する機能とを有するビーム誘導部154を、中継ぎに使用してもよい。
- [0230] ここに、図15は、膜厚方向において膜厚と異なるコア径を有する光ファイバーと結合するために、入射端にテーパーと膜厚方向の屈折率分布とを有するビーム誘導部を設けたGI型フォトニック結晶スラブの膜厚方向と伝搬方向を含む断面概要図である。
- [0231] なお、ビーム誘導部154は、本発明の誘導部に対応する。
- [0232] 図15には、ビームスポット軌跡155も図示した。
- [0233] もちろん、入力側について説明したが、光が双方向に伝搬する場合には、GI型フォトニック結晶スラブの出力側にも入力側と同じ構造を設ければよい。
- [0234] (D)また、上述した実施の形態においては、フォトニック結晶は、膜形状を有し、第一の方向は、膜形状の膜厚の方向であり、第二の方向は、膜形状の膜面に平行な方向であった。
- [0235] しかし、これに限らず、本発明の実施の形態の円柱形状を有するGI型フォトニック結晶の概要図である図19に示されているように、フォトニック結晶は、円柱形状を有し、第一の方向は、円柱形状の底面に平行なx方向およびy方向であり、第二の方向は、円柱形状の長さのz方向であってもよい。また、この場合、円柱の直径が、上記(数3)に用いる膜厚Wに対応する。
- [0236] また、この場合、製造工程における紫外線の照射は、例えば、円柱をその中心軸1901を回転軸として回転させながら行う。尚、照射方法はこれに限らず、結果的に円柱の全周面から中心軸に向けて照射される方法であればどのような方法でも良い。
- [0237] なお、このようなフォトニック結晶は、第一の部材201の中に、z方向に関して実質的に周期的に配置された第二の部材202を有し、第一の部材201は、光軸の方向に対応するz方向に垂直なx方向およびy方向の二方向に、たとえば、中心からの距離に従ってほぼ放物線状に屈折率が低下する屈折率分布を有することになる。

また、上記実施の形態では、GI型フォトニック結晶スラブが、y方向(図2参照)において、上述した(数1)乃至(数3)の何れかに基づいた放物線状に屈折率が低下する屈折率の分布を有する場合を中心に説明したが、これに限らず、要するに、入射される光の光軸の方向に垂直な第一の方向に関して、その光軸から遠ざかるに従って減少する屈折率の分布を有する第一の部材と、その第一の部材の中に、第一の方向とは異なる第二の方向に関して、実質的に周期的に配置された第二の部材と、を有するフォトニック結晶を備えた光デバイスであれば良い。

#### 産業上の利用可能性

- [0238] 本発明の光デバイス、及びフォトニック結晶スラブの製造方法は、たとえば、より簡単な光学系でフォトニック結晶の周期を有さない方向に対して光を閉じ込めることができるという効果を有し、フォトニック結晶スラブの光閉じ込め構造等として有用である。

## 請求の範囲

- [1] 入射される光の光軸の方向に垂直な第一の方向に関して、前記光軸から遠ざかるに従って減少する屈折率の分布を有する第一の部材と、  
前記第一の部材の中に、前記第一の方向とは異なる第二の方向に関して、実質的に周期的に配置された第二の部材と、  
を有するフォトニック結晶を備えた光デバイス。
- [2] 前記光軸から前記遠ざかるに従って減少する屈折率の分布とは、前記第二の部材の前記周期的な配置の方向以外の方向に向かって減少する屈折率の分布である請求の範囲第1項記載の光デバイス。
- [3] (a) 前記第一の部材が有する前記第一の方向に関する屈折率の分布と、  
(b) 前記フォトニック結晶が有する前記第一の方向に関する厚さと、  
(c) 前記入射される光の波長と、  
(d) 前記入射される光の、前記光が入射される前記フォトニック結晶の光入射端部の内側における、前記第一の方向に関するビームスポット半径とは、  
前記入射される光が前記第一の方向に関して前記フォトニック結晶の内部に実質上閉じ込められるように決定されている請求の範囲第2項記載の光デバイス。
- [4] 前記フォトニック結晶は、膜形状を有し、  
前記第一の方向は、前記膜形状の膜厚の方向であり、  
前記第二の方向は、前記膜形状の膜面に平行な方向である請求の範囲第3項記載の光デバイス。
- [5] 前記第一の部材が有する前記膜厚の方向に関する屈折率の分布は、前記フォトニック結晶が有する前記膜厚の方向に関する厚さ $W$ と、前記入射される光の波長 $\lambda$ と、  
前記入射される光の、前記光入射端部の内側における、前記膜厚の方向に関するビームスポット半径 $\omega_1$ とに基づいて決定される所定の分布関数よりも大きな急峻性を有する請求の範囲第4項記載の光デバイス。
- [6] 前記所定の分布関数は、前記光軸を基準とする前記膜厚の方向に関する座標 $y$ についての、屈折率分布定数 $g$ 、および前記屈折率の最大値 $n_1$ を有する二次関数  
[数1]



$$n(y) = n_1 \left( 1 - \frac{g^2 y^2}{2} \right)$$

で実質的に与えられる請求の範囲第5項記載の光デバイス。

- [7] 前記所定の分布関数は、前記光軸を基準とする前記膜厚の方向に関する座標 $y$ についての、屈折率分布定数 $g$ 、平坦部分定数 $a$ 、および前記屈折率の最大値 $n_1$ を有する関数

[数2]

$$n'(y) = \begin{cases} n_1 \left\{ 1 - \frac{g^2 (y+a)^2}{2} \right\} & (y \leq -a) \\ n_1 & (-a \leq y \leq a) \\ n_1 \left\{ 1 - \frac{g^2 (y-a)^2}{2} \right\} & (a \leq y) \end{cases}$$

で実質的に与えられる請求の範囲第5項記載の光デバイス。

- [8] 前記屈折率分布定数 $g$ は、

[数3]

$$g \geq \frac{2\lambda}{\pi \omega_1 W}$$

を実質的に満足する請求の範囲第6または7項記載の光デバイス。

- [9] 前記入射される光の波面の前記光入射端部における曲率半径は、実質的に無限大である請求の範囲第5項記載の光デバイス。
- [10] 前記ビームスポット半径 $\omega_1$ は、前記厚さ $W$ の実質的に半分である請求の範囲第9項記載の光デバイス。
- [11] 前記膜厚は、所定の箇所において変化している請求の範囲第9項記載の光デバイス。
- [12] 前記第一の部材が有する前記膜厚の方向に関する屈折率の分布と、前記フォトニッ

ク結晶が有する前記膜厚の方向に関する厚さ $W$ と、前記入射される光の波長 $\lambda$ と、前記入射される光の、前記光入射端部の内側における、前記膜厚の方向に関するビームスポット半径 $\omega_1$ とは、前記入射される光が前記所定の箇所においては前記膜厚の方向に関して前記フォトニック結晶の外部に漏れるように決定されている請求の範囲第11項記載の光デバイス。

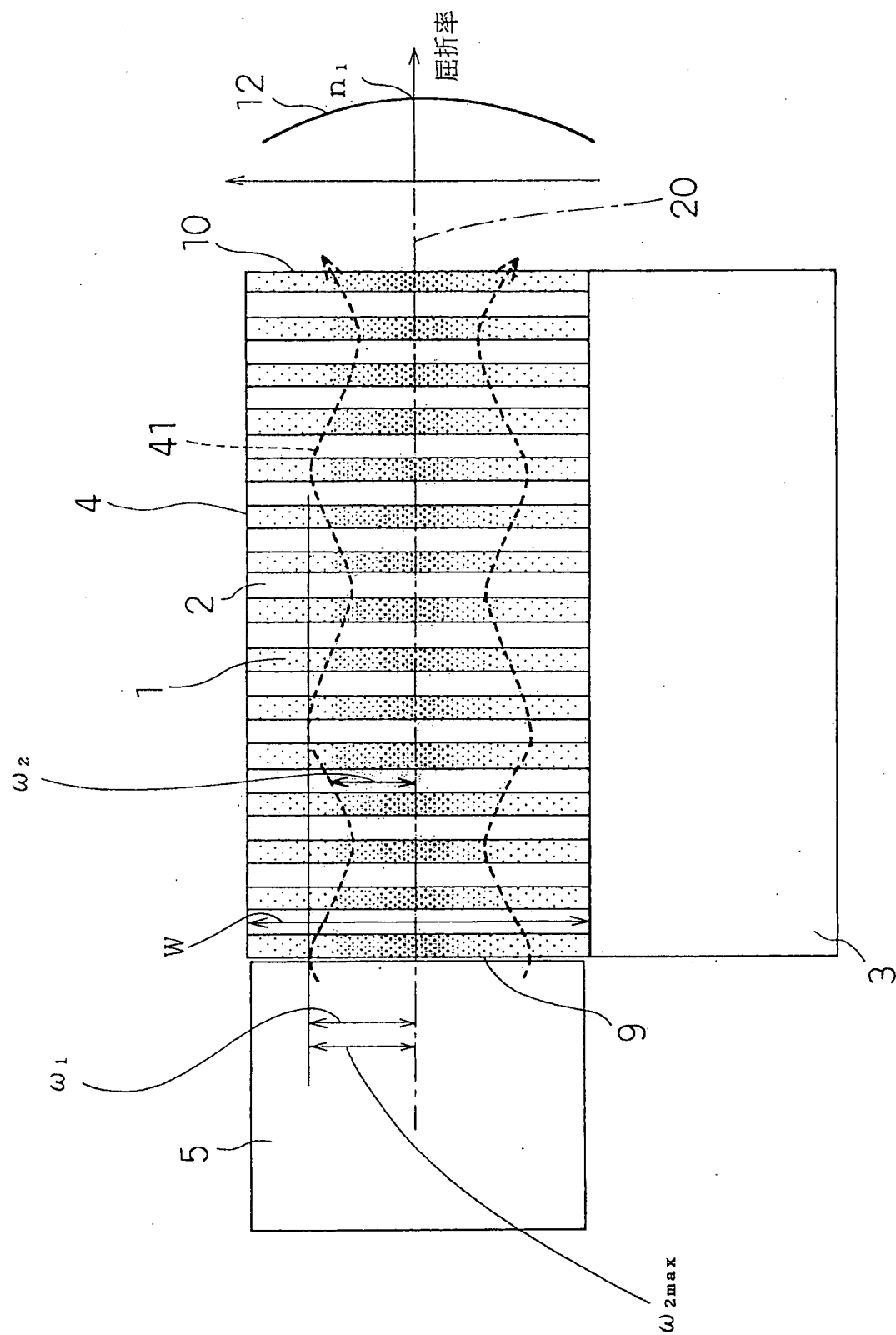
- [13] 前記第二の部材の実質的に周期的な配置は、所定の箇所において変化している請求の範囲第9項記載の光デバイス。
- [14] 前記所定の箇所は、前記入射される光の、前記フォトニック結晶の内側における、前記膜厚の方向に関するビームスポット半径が極大値または極小値をとる箇所である請求の範囲第13項記載の光デバイス。
- [15] 前記所定の箇所は、前記光入射端部から前記光が出射される前記フォトニック結晶の光出射端部まで連続した、前記第二の部材が実質的に配置されていない箇所である請求の範囲第13項記載の光デバイス。
- [16] 前記第二の部材は、前記膜厚の方向に延びた空孔を利用して配置された空気である請求の範囲第9項記載の光デバイス。
- [17] 前記フォトニック結晶を保持する基板をさらに備え、  
前記空孔は、前記基板の側に延びている請求の範囲第16項記載の光デバイス。
- [18] 前記入射される光を、前記光入射端部に誘導するための誘導部をさらに備えた請求の範囲第3項記載の光デバイス。
- [19] 前記誘導部は、前記入射される光を、その波面の前記光入射端部における曲率半径が実質的に無限大となるように変換する請求の範囲第18項記載の光デバイス。
- [20] 前記誘導部は、前記入射される光を、ビームウェストが前記光入射端部において形成されるように変換する請求の範囲第18項記載の光デバイス。
- [21] 前記誘導部は、前記入射される光を、その前記光入射端部の内側における前記第一の方向に関するビームスポット半径が実質的に前記フォトニック結晶が有する前記第一の方向に関する厚さの半分となるように変換する請求の範囲第18項記載の光デバイス。
- [22] 前記第一の部材は、ポリシランを主成分とする基材にシロキサン構造が前記屈折率

の分布に対応して分布している部材である請求の範囲第3項記載の光デバイス。

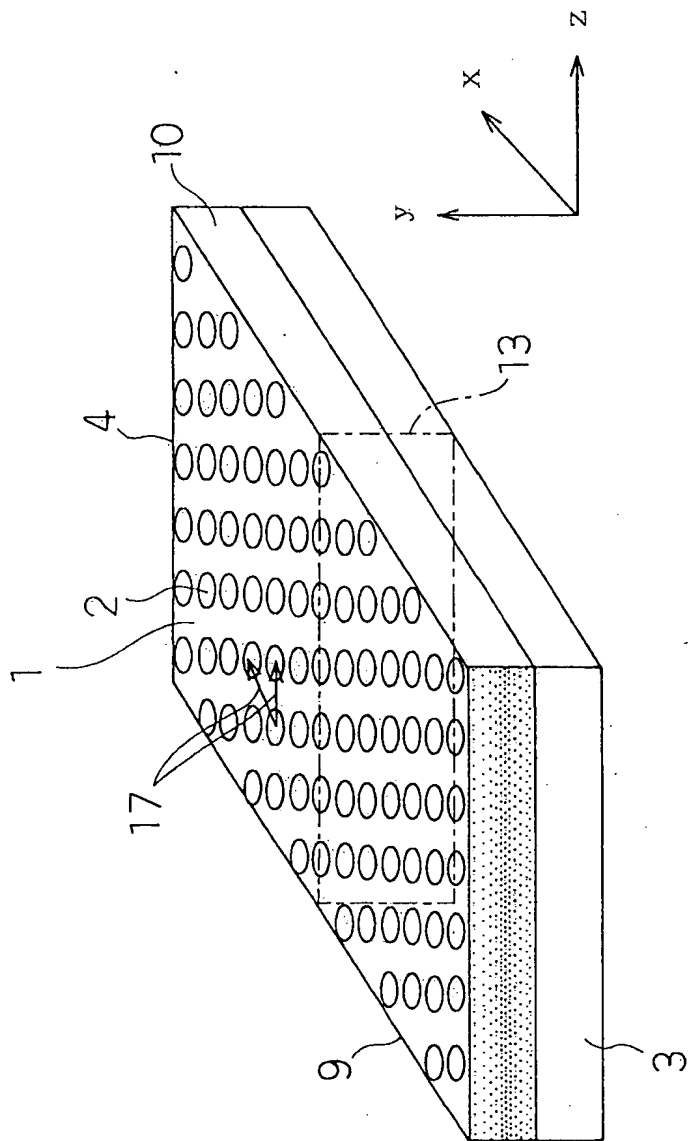
- [23] 入射される光の光軸の方向に垂直な第一の方向に関して、屈折率の分布を有する第一の部材と、前記第一の部材の中に、前記第一の方向とは異なる第二の方向に関して、実質的に周期的に配置された第二の部材とを有するフォトニック結晶スラブの製造方法であって、
- ポリシランを主成分とし所定の厚みを有する基材を供給する第1工程と、
- 前記供給された基材に対し、前記ポリシランの酸化反応を起こさせるとともに、前記厚み方向を基準として前記酸化反応の進行の程度を制御することにより、前記光軸から遠ざかるに従って減少する屈折率の分布を形成する第2工程と、
- 前記第2工程の前の工程又は、後の工程において、前記第二の部材を形成する第3工程と、
- を備えたフォトニック結晶スラブの製造方法。
- [24] 前記光軸から前記遠ざかるに従って減少する屈折率の分布とは、前記第二の部材の前記周期的な配置の方向以外の方向に向かって減少する屈折率の分布である請求の範囲第23項記載のフォトニック結晶スラブの製造方法。
- [25] 前記第一の方向は、前記基材の厚みの方向であり、
- 前記第二の方向は、前記基材の表面に平行な方向である請求の範囲第24項記載のフォトニック結晶スラブの製造方法。
- [26] 前記第2工程では、前記基材に対し、その両面側から紫外線を照射することにより前記屈折率の分布を生じさせ、
- 前記屈折率の分布の仕方が予め定めた基準を満たす様に、前記紫外線の照射量を制御する請求の範囲第25項記載のフォトニック結晶スラブの製造方法。
- [27] 前記第1工程では、前記基材を所定の基板上に塗布し、
- 前記第2工程では、前記塗布された基材に対し、前記紫外線の照射と共に熱処理を行うことにより、前記基材を硬化させ、
- 前記第3工程では、前記硬化した前記基材に対して、金型を用いるか、又はエッチングを行うことにより前記第二の部材としての円筒状の空孔を周期的に配置させる請求の範囲第26に項記載のフォトニック結晶スラブの製造方法。

- [28] 前記予め定めた基準とは、前記屈折率の分布が、前記フォトニック結晶スラブが有する膜厚の方向に関する厚さ $W$ と、前記入射される光の波長 $\lambda$ と、前記入射される光の、光入射端部の内側における、前記膜厚の方向に関するビームスポット半径 $\omega_1$ とに基づいて決定される所定の分布関数よりも大きな急峻性を有することである請求の範囲第27に項記載のフォトニック結晶スラブの製造方法。

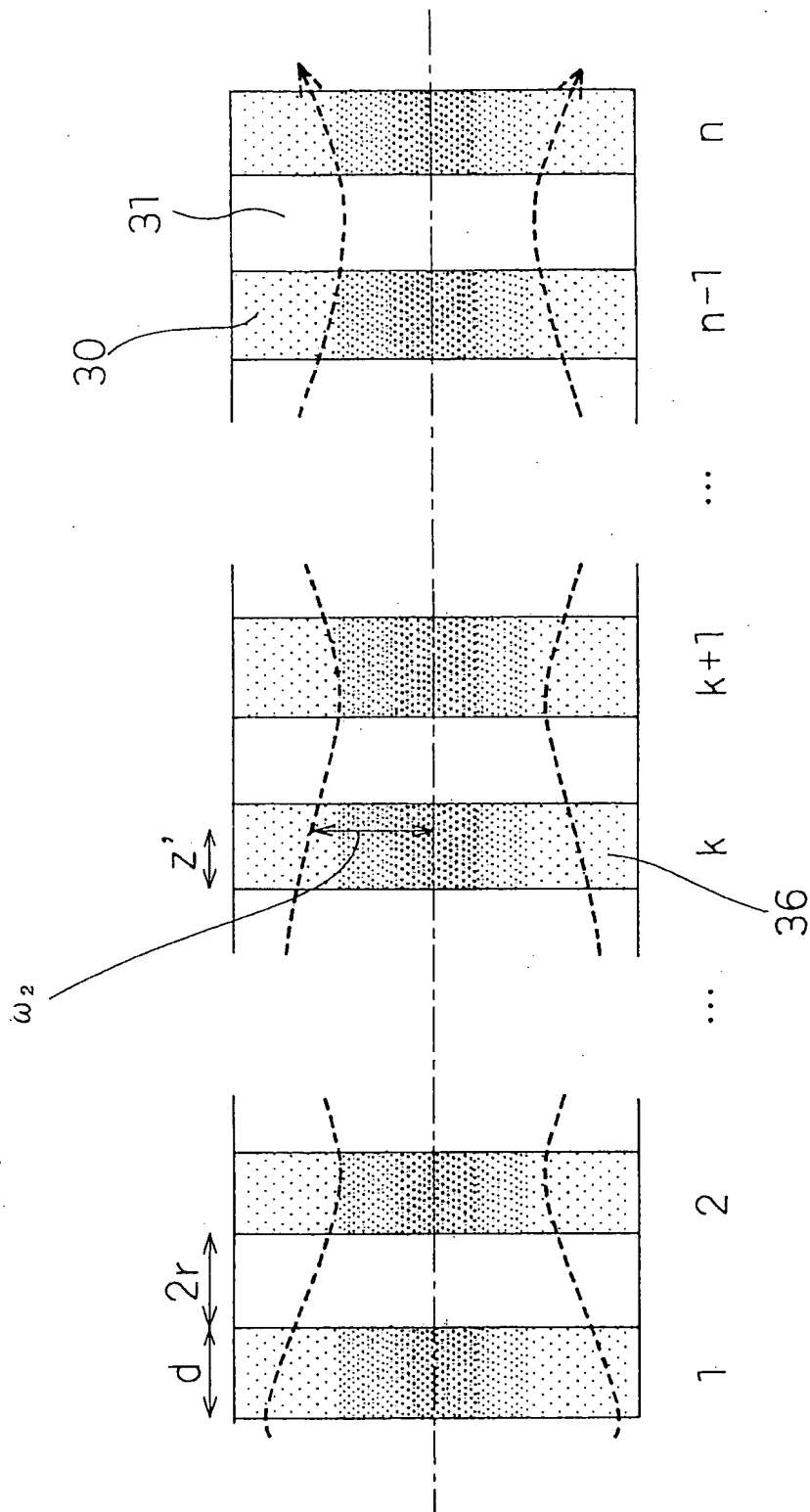
[図1]



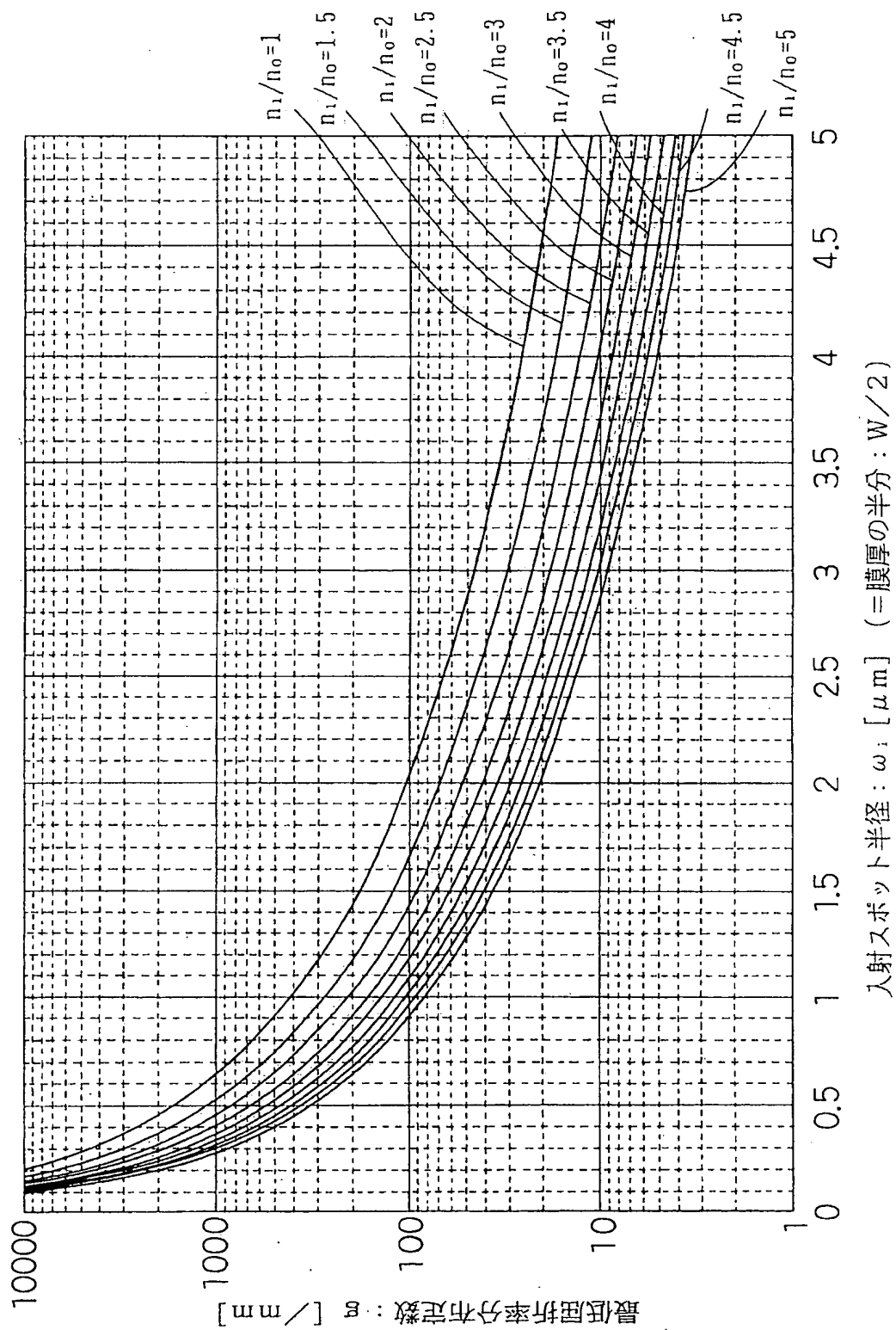
[図2]



[図3]

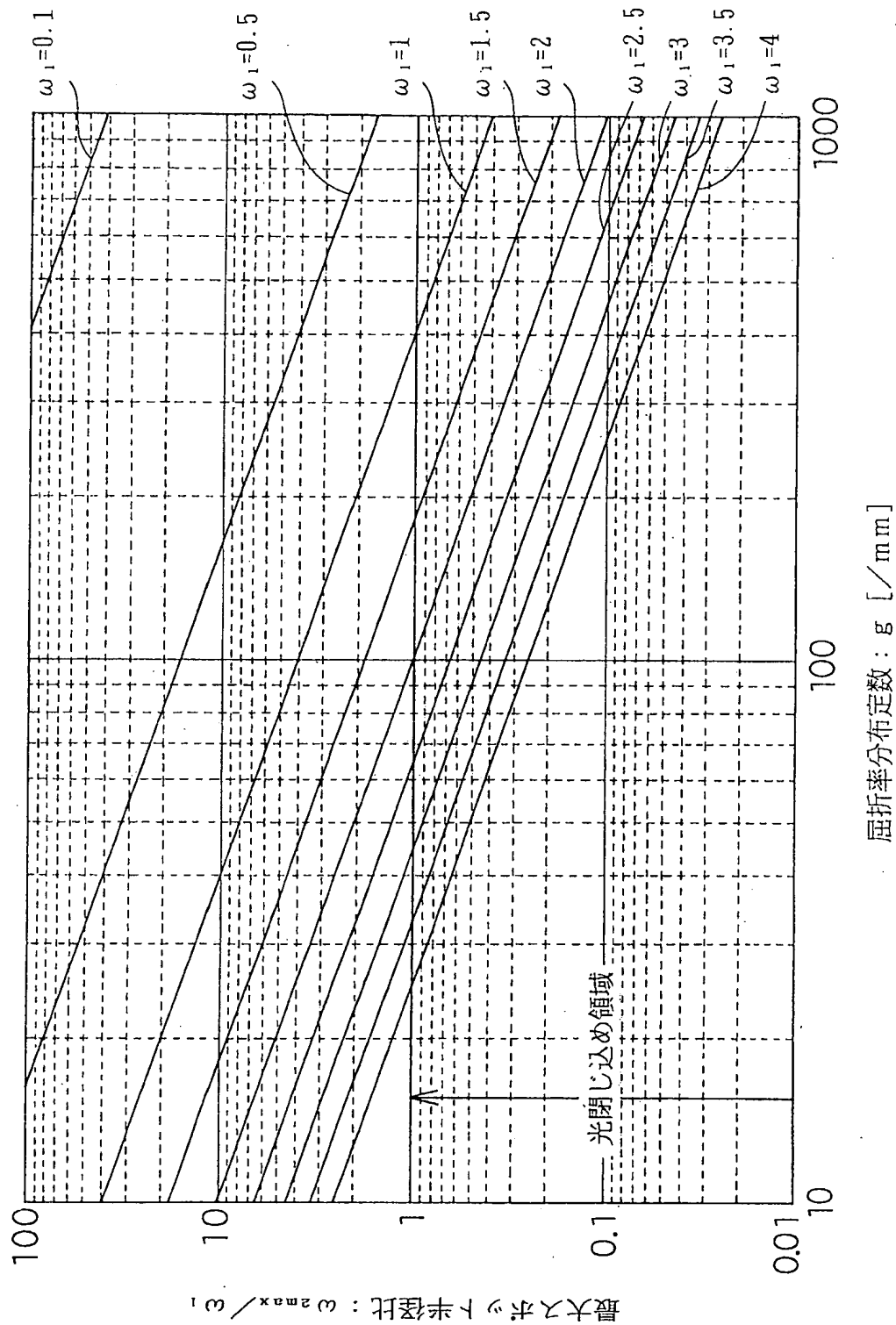


[図4]

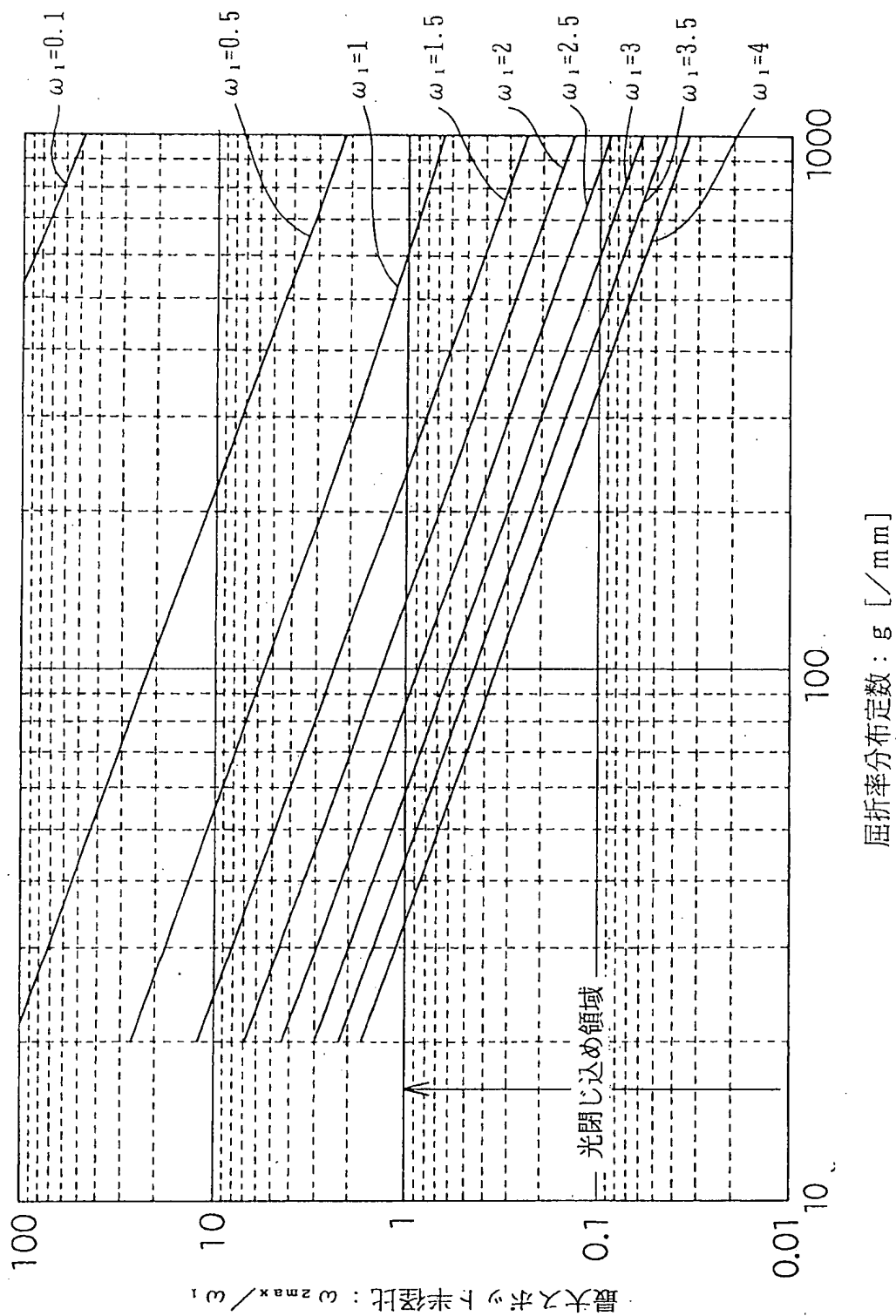




[図5]

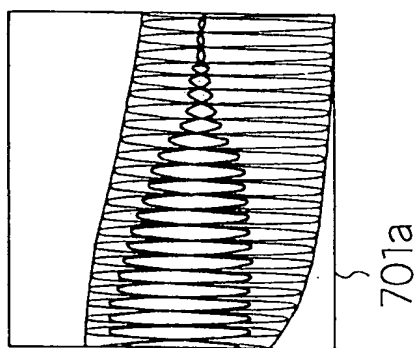
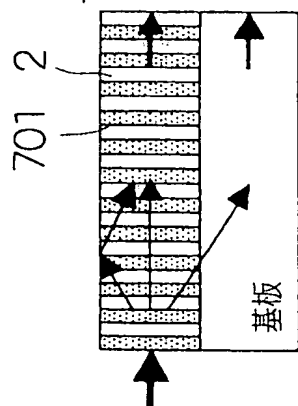


[図6]

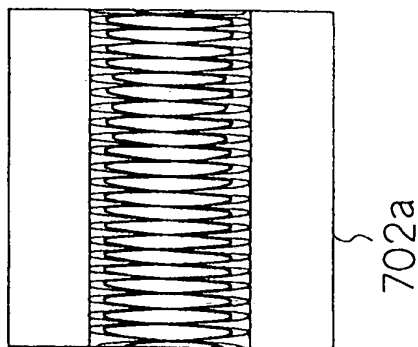
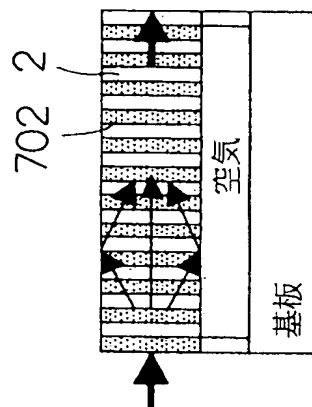


[図7]

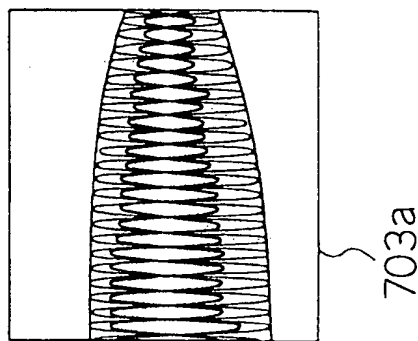
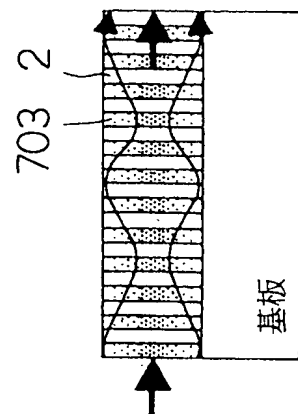
(a)



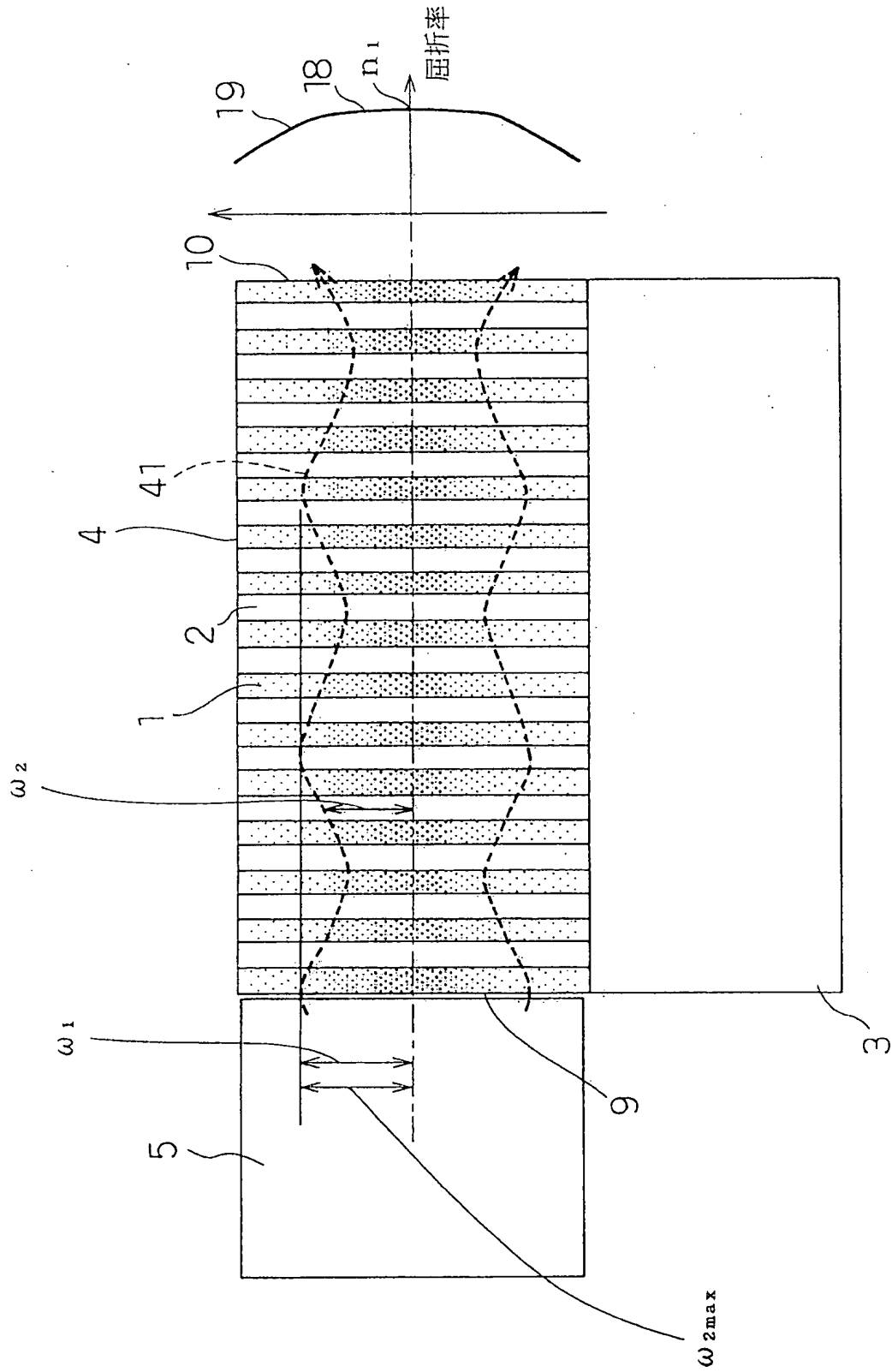
(b)



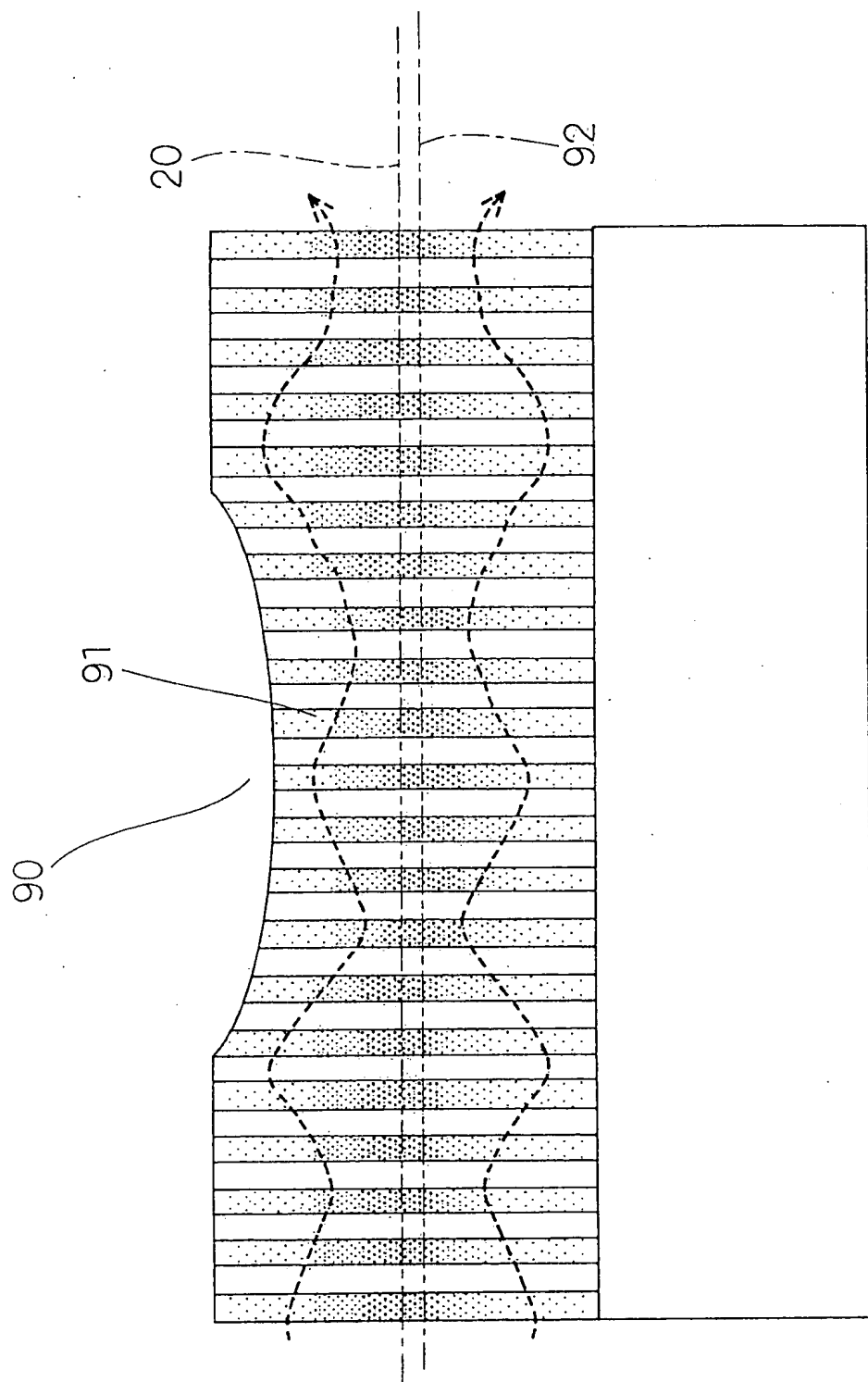
(c)



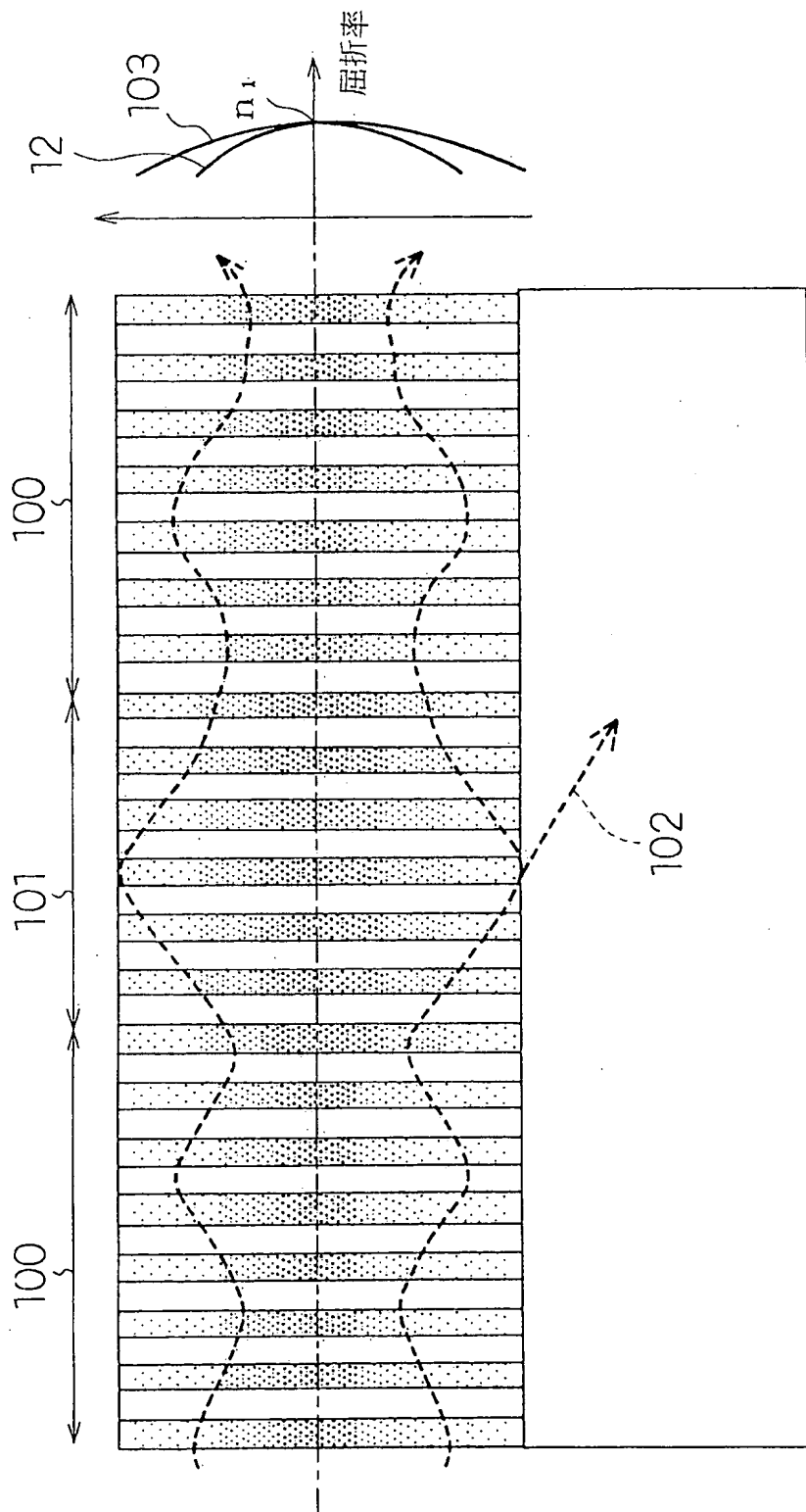
[図8]



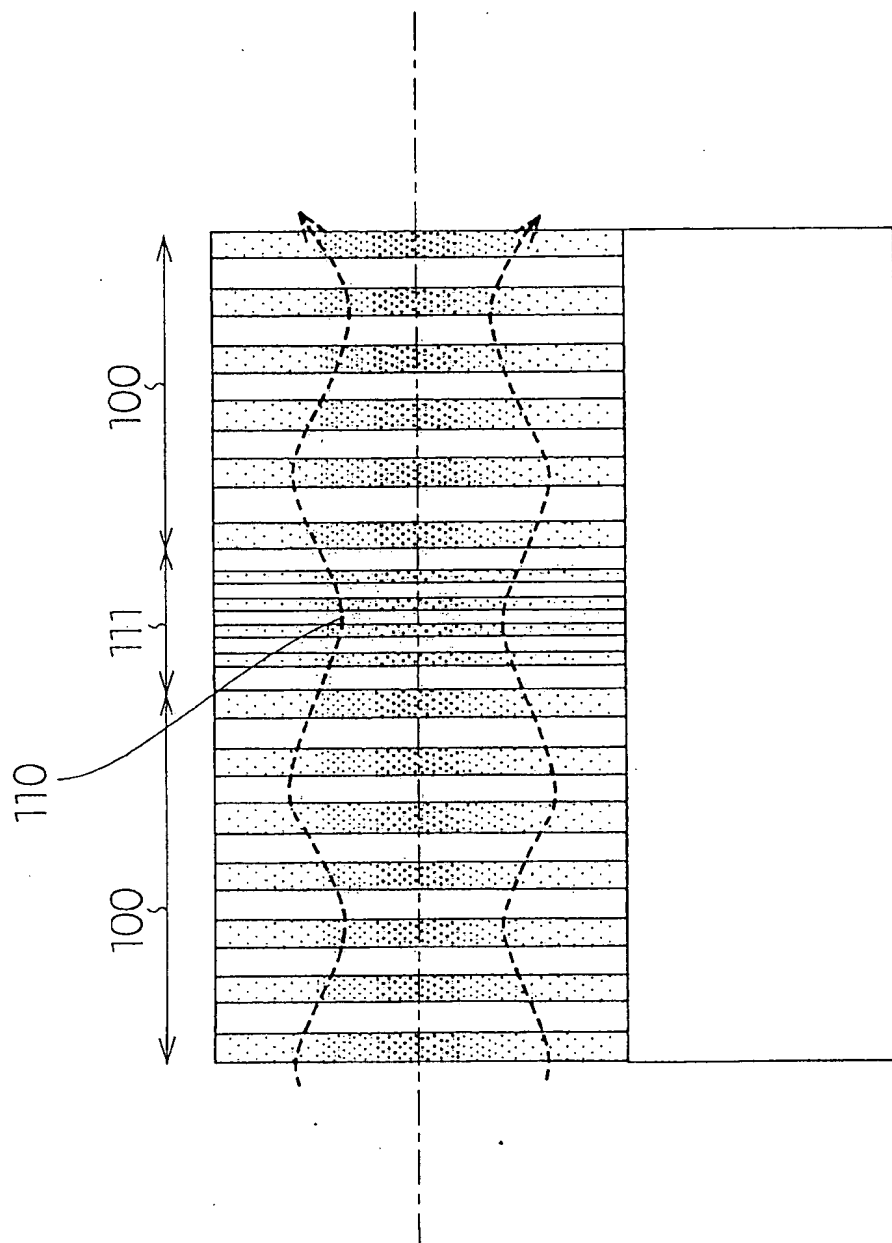
[図9]



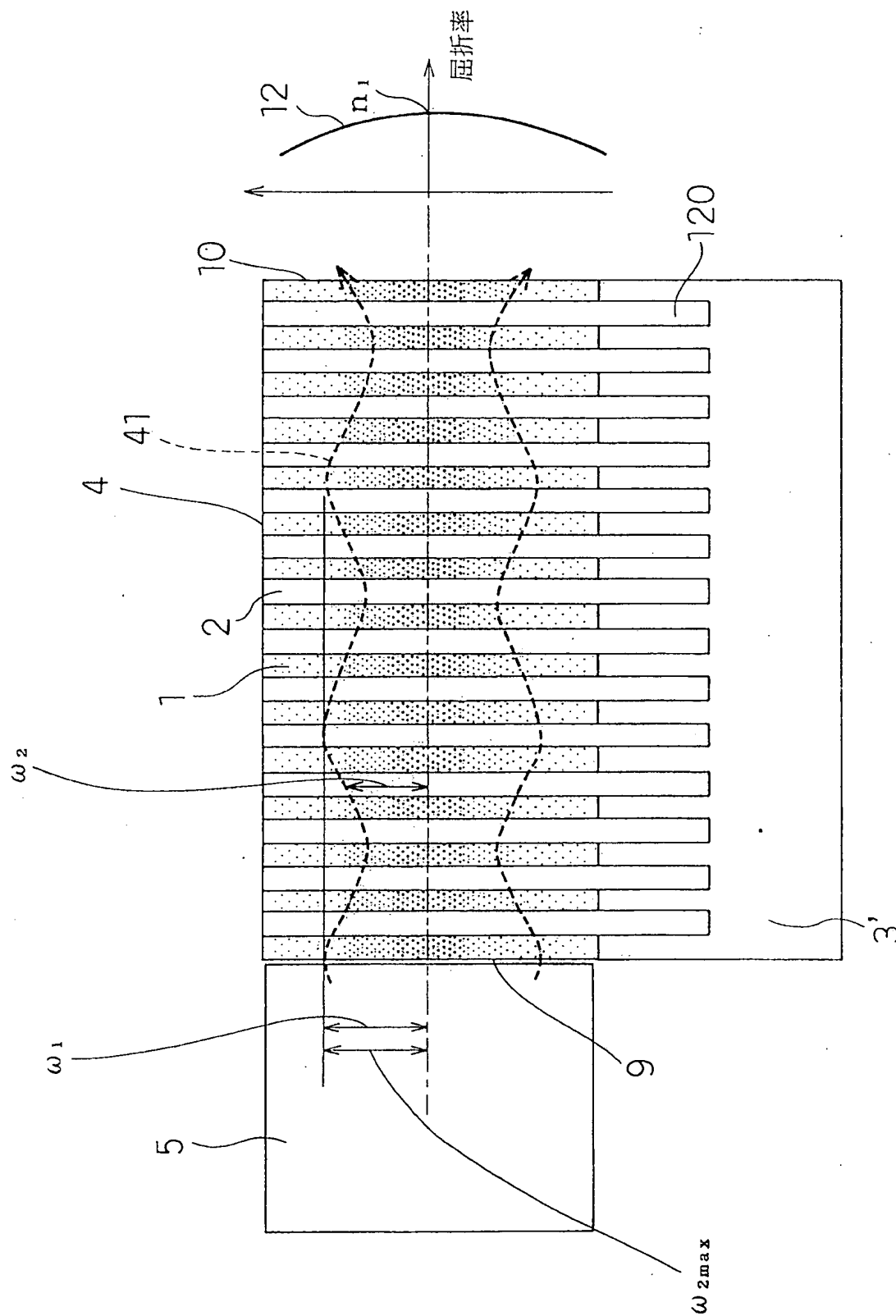
[図10]



[図11]

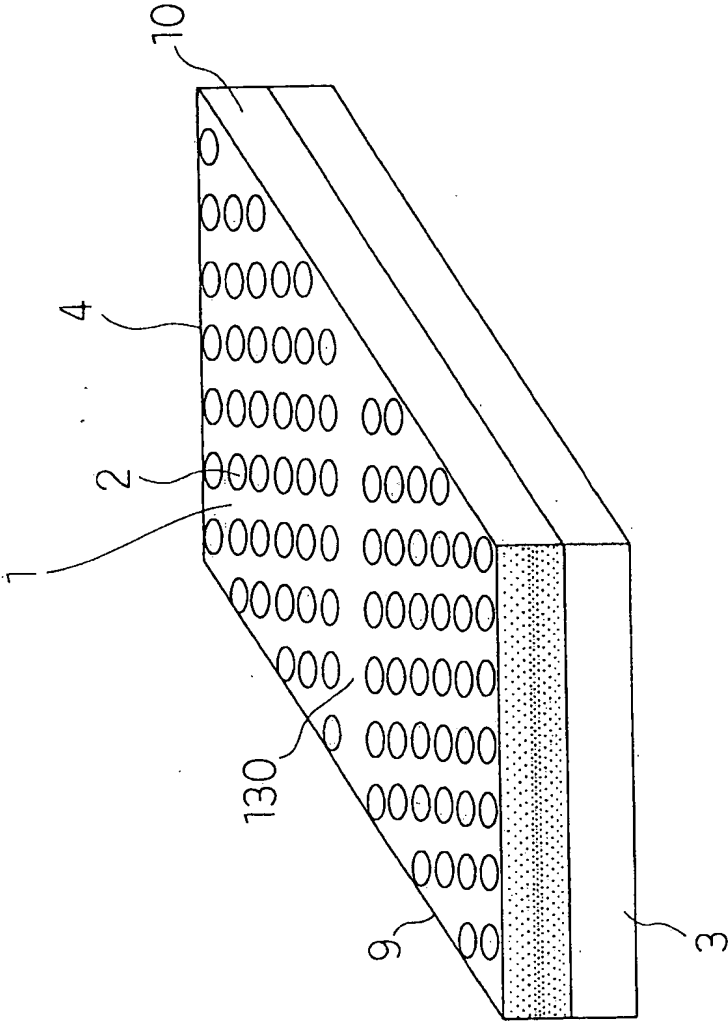


[図12]

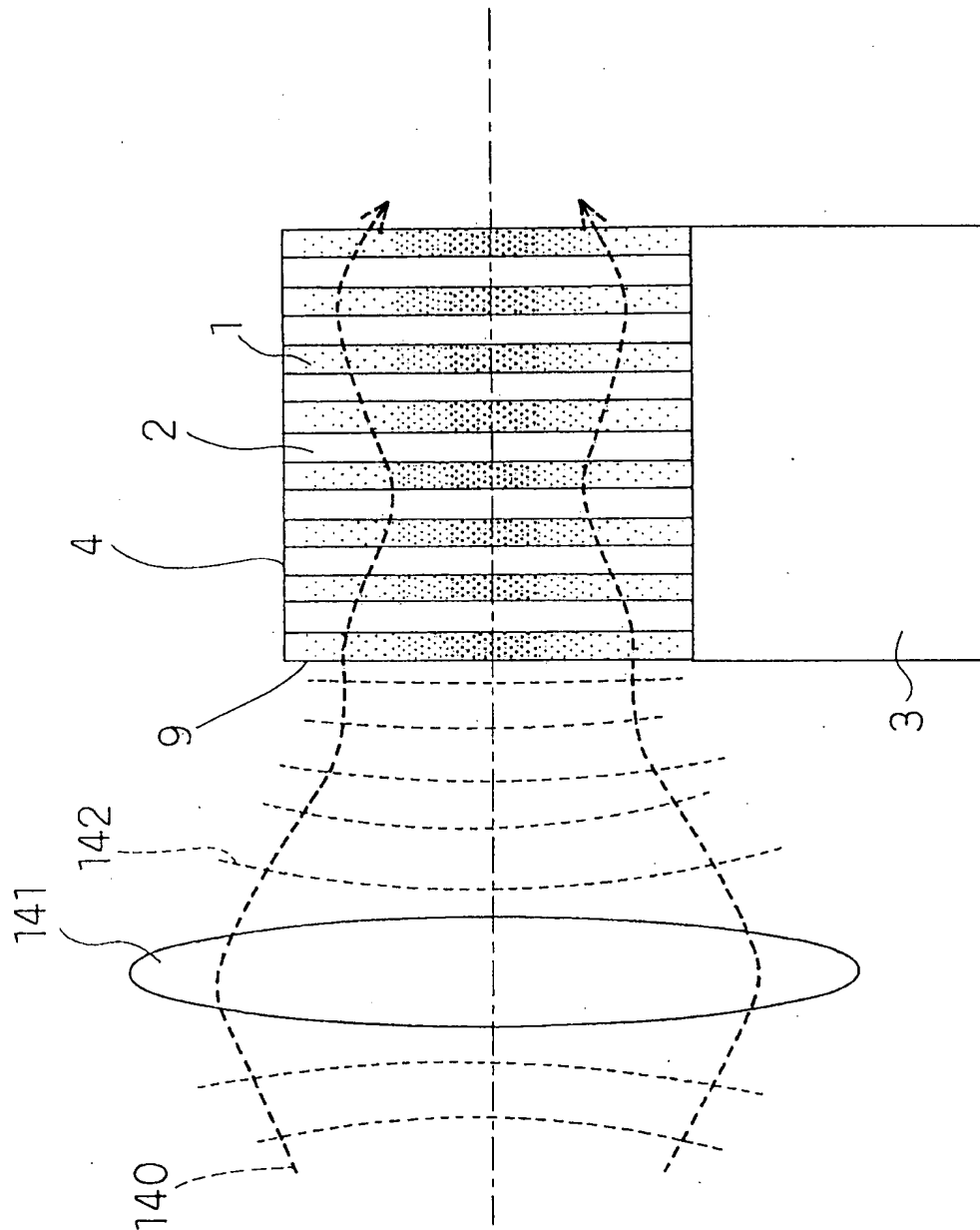




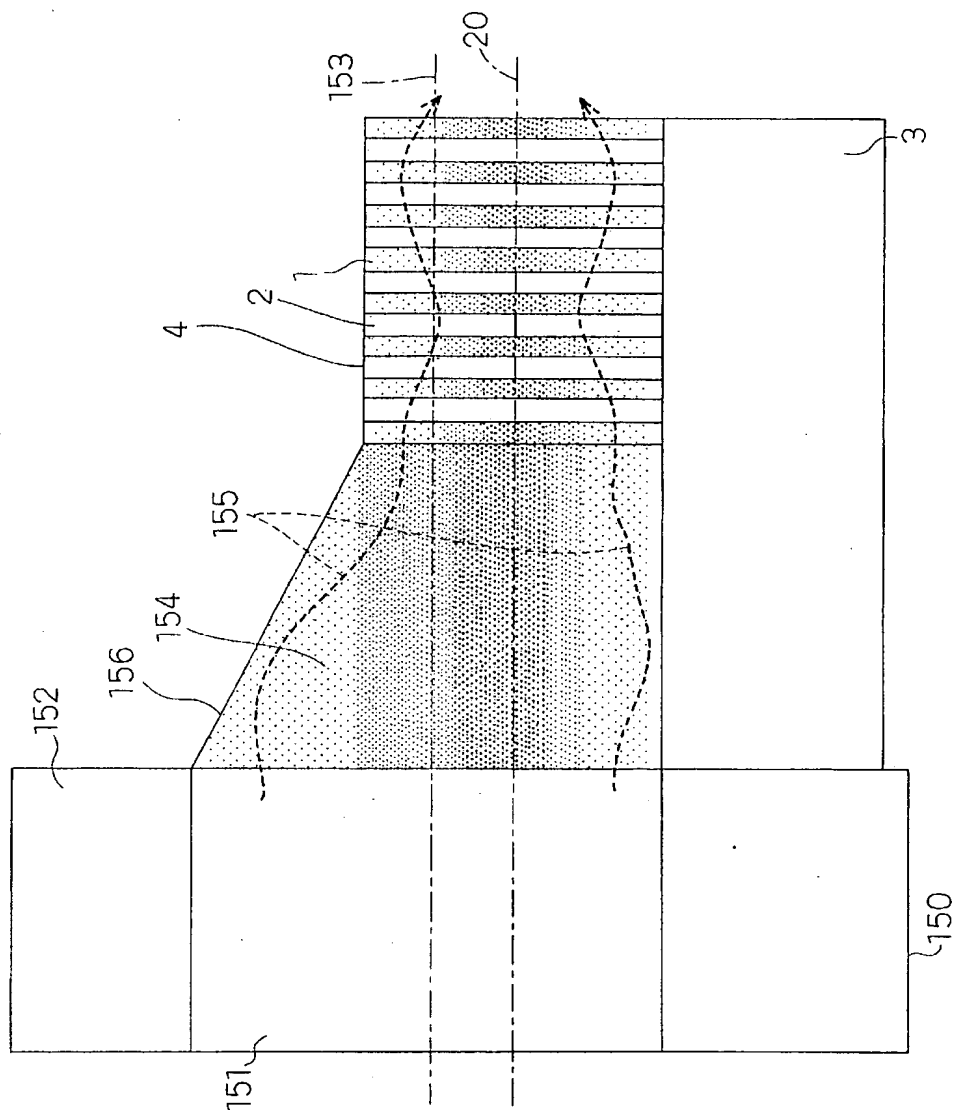
[図13]



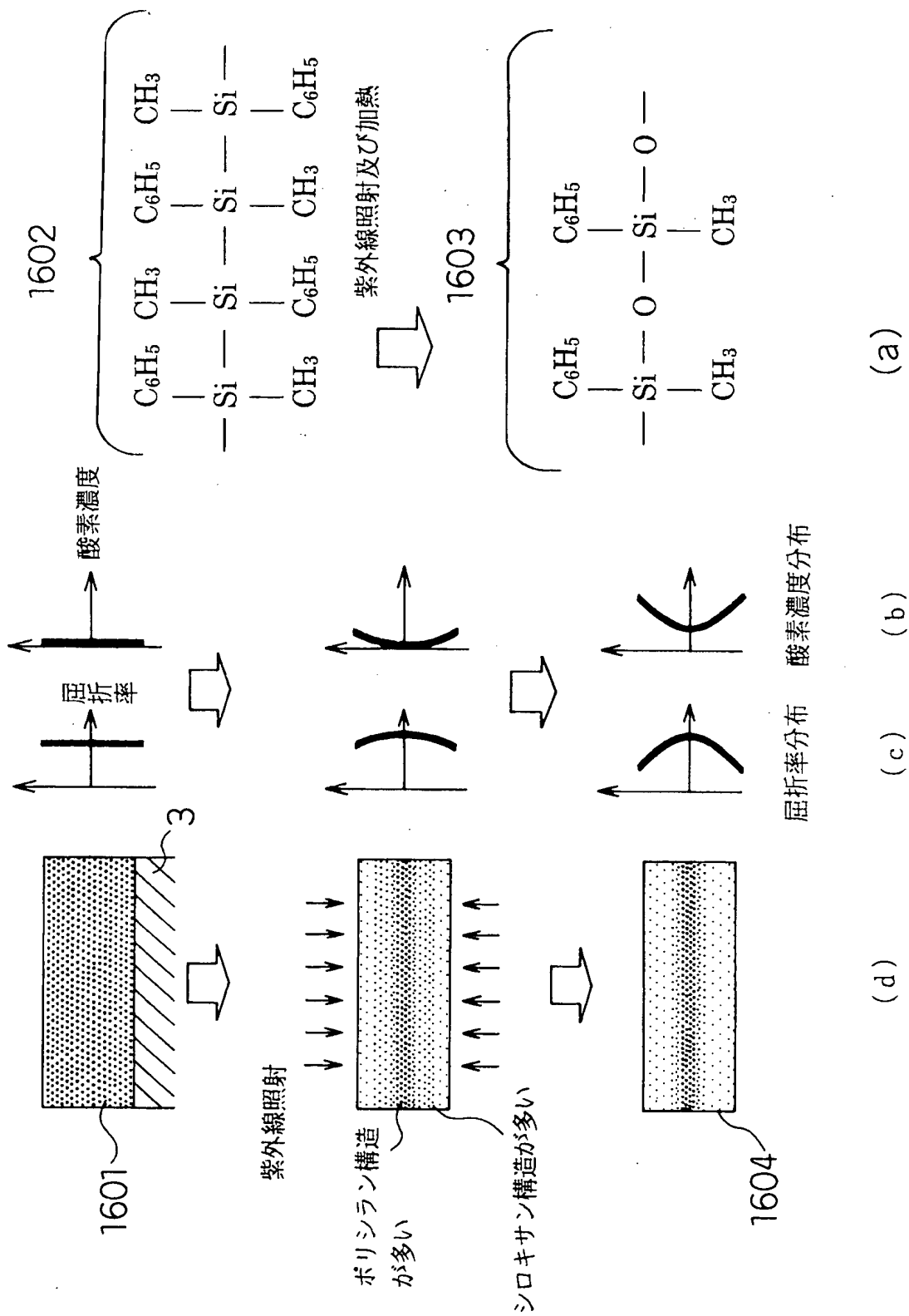
[図14]



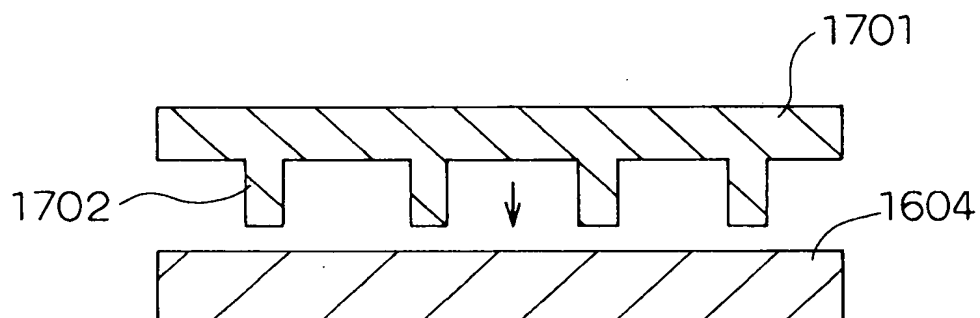
[図15]



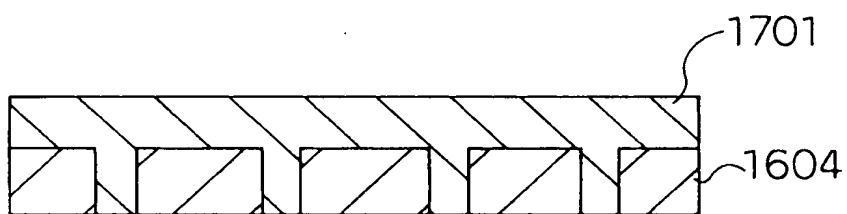
[図16]



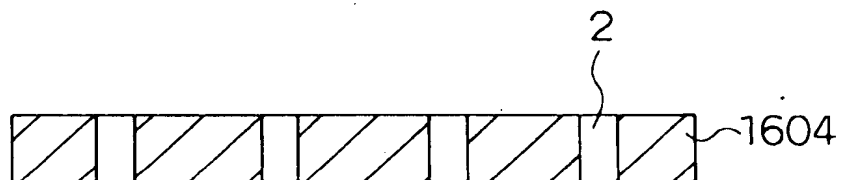
[図17]



(a)

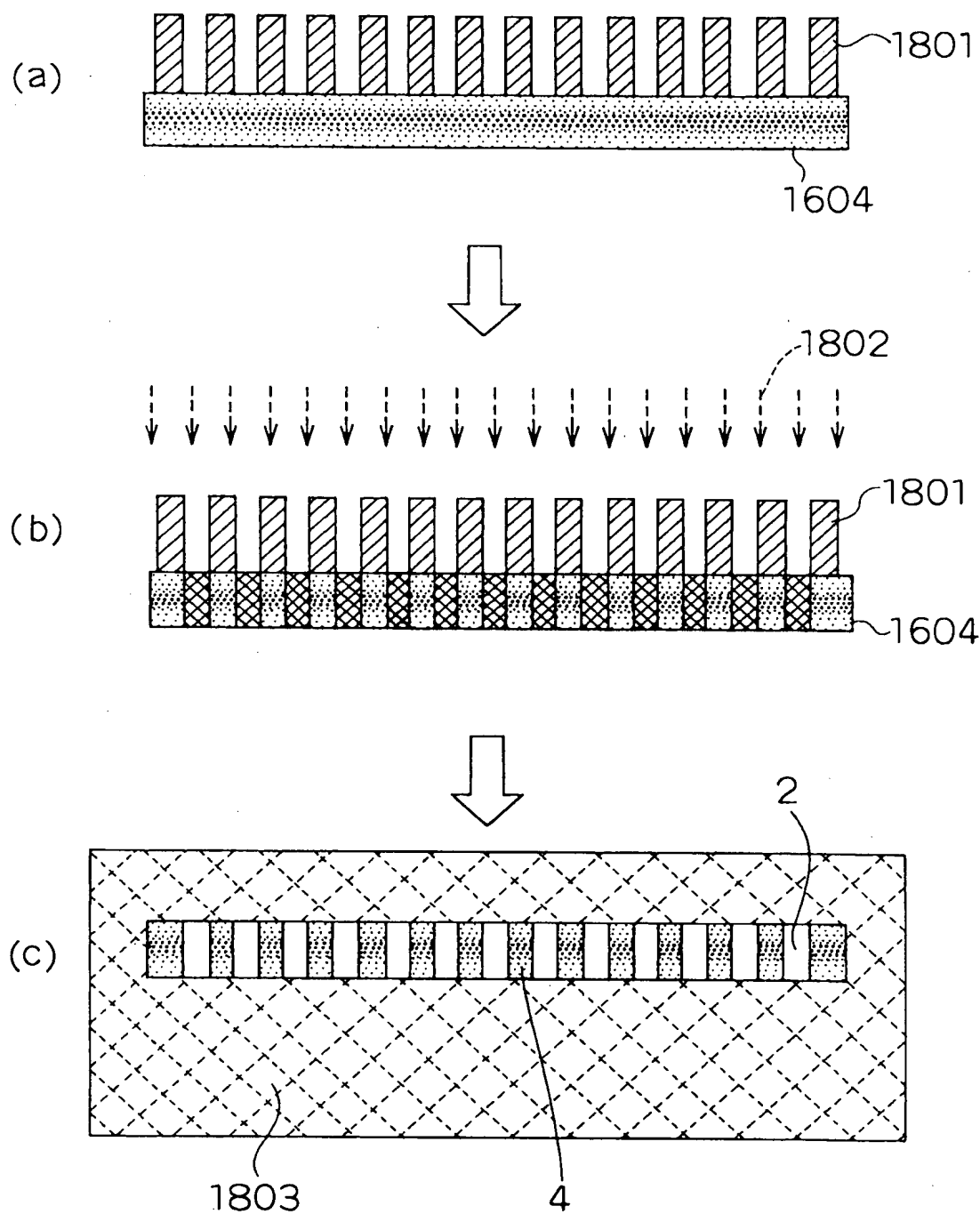


(b)



(c)

[図18]



[図19]

